

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

Rechnerische Untersuchungen
zu Rauch- und Wärmeabzug bei Bränden
(Vergleich Rechnung und Messung)

TEIL I

von

Prof. Dr.-Ing. K. Kordina
Dr.-Ing. R. Dobbernack

Oktober 1983

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Innenministers des Landes Nordrhein-Westfalen in Zusammenarbeit mit dem Staatl. Materialprüfamt des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführt (AZ: V B I - 72.02 - Nr. 87 - 77).

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| Verwendete Formelzeichen | III |
| 1. Einleitung und Problemstellung | 1 |
| 2. Theoretische Grundlagen | 2 |
| 2.1 Allgemeines | 2 |
| 2.2 Brandraummodell | 5 |
| 2.3 Bilanzgleichungen der Brandraumsegmente | 8 |
| 2.3.1 Energiefreisetzung | 9 |
| 2.3.2 Plume-Einfluß | 12 |
| 2.3.3 Rauch- und Heißgasschicht | 15 |
| 2.3.4 Untere Luftschicht | 17 |
| 2.3.5 Umfassungsbauteile | 19 |
| 2.4 Bestimmung der Energie- und Massenänderung | 20 |
| 2.4.1 Konvektive Energien | 20 |
| 2.4.1.1 Plume-Gasschicht | 20 |
| 2.4.1.2 Gas- und Luftschicht - Umfassungsbauteil | 22 |
| 2.4.1.3 Wandöffnungen - Brandraum | 24 |
| 2.4.2 Wärmeleitung in die Umfassungsbauteile | 25 |
| 2.4.3 Wärmestrahlungsenergie | 26 |
| 2.4.3.1 Allgemeine Voraussetzungen | 27 |
| 2.4.3.2 Grundlagen der Monte-Carlo-Methode | 34 |
| 2.4.3.3 Anwendung auf Brandräume | 39 |
| 2.4.3.4 Absorptionszahlen | 42 |
| 2.4.3.5 Strahlungsaustausch im Gesamtbrandraum | 48 |
| 2.5 Zusammenfassung (theoretischer Teil) | 51 |
| 3. Versuchsdurchführung | 53 |
| 3.1 Allgemeines | 53 |
| 3.2 Versuchsanordnung | 53 |
| 3.3 Art der durchgeführten Versuche | 55 |
| 3.4 Meßergebnisse | 56 |
| 4. Vergleich Rechnung - Messung | 58 |
| 4.1 Vorbereitungen zu den Rechnungen | 58 |
| 4.2 Vorversuche (Versuchsreihe a) | 61 |
| 4.3 Reproduzierbarkeit und Wettereinflüsse (Versuchsreihe b) | 62 |

| | |
|--|----|
| 4.4 Variation der Dachentlüftungsfläche (Versuchsreihe c) | 65 |
| 4.5 Einfluß der Fläche der Brandlast (Versuchsreihe d) | 67 |
| 4.6 Einfluß der Brandlastmenge (Versuchsreihe e) | 68 |
| 4.7 Einfluß verschiedener Brandlasten (Versuchsreihe f) | 70 |
| 4.8 Einfluß des Brandlastortes zur Anordnung der RWA-Öffnungen (Versuchsreihe g) | 71 |
| 4.9 Flächenhaft angeordnete Brandgüter und Einfluß des Zünd- ortes auf das Brandgeschehen (Versuchsreihe h) | 72 |
| 5. Zusammenfassung und Aussagen zur DIN 18 232 | 74 |
| 6. Literaturverzeichnis | 79 |

Verwendete Formelzeichen

| | | |
|-----------------|--|---------------------------------|
| A | Fläche | m ² |
| A _D | Fläche der Dachöffnung | m ² |
| a | Absorptionskoeffizient | 1/m |
| B | Brandraumbreite | m |
| b _f | Fensterbreite | m |
| C _s | Stahlungskoeffizient | W/m ² K ⁴ |
| c | Kontraktionskoeffizient | - |
| c _e | dimensionsloser Plume-Höhenbeiwert (Zukoski) | - |
| c _{pg} | spez. Wärmekapazität der Gasschicht | kJ/kgK |
| c _{pl} | spez. Wärmekapazität der Luft | kJ/kgK |
| c _{pp} | spez. Wärmekapazität der Plume-Gase | kJ/kgK |
| c _v | dimensionsloser Geschwindigkeitsbeiwert (Zukoski) | - |
| c _w | spez. Wärmekapazität der Wand | kJ/kgK |
| E _x | Verhältnis der Zusatzluft zum stöchiometrischen Luftbedarf | kgL/kgL stöch |
| e _s | Wärmefluß durch Strahlung pro Zeit und Fläche | W/m ² s |
| g | Erdbeschleunigung | m/s ² |
| H | Brandraumhöhe | m |
| H _f | Flammenhöhe | m |
| H _g | Gasschichthöhe | m |
| H _l | Luftschichthöhe | m |
| H _p | Höhe des Plume | m |
| H _u | unterer Heizwert | kJ/kg |
| h' | Fensteroberkante bis Raumabschluß | m |
| h _c | freigesetzte Energie im Brandraum | kJ/s |
| h _o | Fensterhöhe | m |
| h _f | Gasschichthöhe ohne Einschnürung | m |
| h' _f | Gasschichthöhe mit Einschnürung | m |
| h _p | Energieinhalt des Plume vor der Gasschicht | kJ/s |
| i _s | Strahlungsintensität | W/m ² s |
| K | Entrainment-Koeffizient | - |
| L | Brandraumlänge | m |
| l | Weglänge im Gas | m |
| m | Masse | kg |
| ṁ | Massenstrom | kg/s |
| ṁ _a | Gesamt-Luftmassenstrom im Plume | kg/s |
| ṁ | Massenstrom Zusatzluft in den Plume | kg/s |
| ṁ _d | Massenstrom durch Dachöffnung | kg/s |

| | | |
|--------------------|---|--------|
| \dot{m}_e | Massenstrom durch sämtliche Öffnungen | kg/s |
| \dot{m}_f | Massenstrom durch seitliche Wandöffnung | kg/s |
| \dot{m}_g | Massenstrom der Gasschicht | kg/s |
| m_l | Masse der Luftschicht | kg |
| \dot{m}_o | einströmender Massenstrom | kg/s |
| \dot{m}_p | Massenstrom des Plume vor der Gasschicht | kg/s |
| \dot{m}_v | Luftmassenstrom für stöchiometrische Verbrennung | kg/s |
| N_{co} | Verbrennungszahl | - |
| N_f | Zahl der Energieteile einer Fläche | - |
| n | Segmentzahl | - |
| \dot{Q} | Wärmestrom, Wärmefluß | kJ/s |
| \dot{Q}_a | Wärmestrom von der Luftschicht im Plume | kJ/s |
| $\dot{Q}_{b,res}$ | Wärmestrom, resultierend, an der Bodeninnenseite | kJ/s |
| $\dot{Q}_{d,res}$ | Wärmestrom, resultierend, an der Deckeninnenseite | kJ/s |
| $\dot{Q}_{g,ab}$ | Summe der Wärmeströme, abgegeben von der Gasschicht | kJ/s |
| $\dot{Q}_{g,zu}$ | Summe der Wärmeströme in die Gasschicht | kJ/s |
| $\dot{Q}_{k,b-l}$ | Wärmestrom durch Konvektion, Boden - Luft | kJ/s |
| $\dot{Q}_{k,g-d}$ | Wärmestrom durch Konvektion, Gasschicht - Decke | kJ/s |
| $\dot{Q}_{k,g-e}$ | Wärmestrom durch Ausfließen aus den Öffnungen | kJ/s |
| $\dot{Q}_{k,p-g}$ | Wärmestrom durch Konvektion, Plume - Gasschicht | kJ/s |
| \dot{Q}_o | Wärmestrom | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,b,ab}$ | Gesamtabgestrahlter Wärmestrom des Bodens | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,b-b}$ | Wärmestrom, Strahlung, Boden - Boden | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,b-d}$ | Wärmestrom, Strahlung, Boden - Decke | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,d,ab}$ | Gesamtabgestrahlter Wärmestrom der Decke | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,d-b}$ | Wärmestrom, Strahlung, Decke - Boden | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,d-d}$ | Wärmestrom, Strahlung, Decke - Decke | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,d-g}$ | Strahlungswärmestrom, Decke - Gasschicht | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,F}$ | Wärmestrom durch Strahlung von der Verbrennungszone | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,g,ab}$ | Strahlungswärmestrom der Gasschicht in die Umgebung | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,g-b}$ | Wärmestrom, Strahlung, Gasschicht - Boden | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,g-d}$ | Wärmestrom, Strahlung, Gasschicht - Decke | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,g-g}$ | Strahlungswärmestrom, Gasschicht - Gasschicht | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,p-b}$ | Wärmestrom, Strahlung, Plume - Boden | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,p-d}$ | Wärmestrom, Strahlung, Plume - Decke | kJ/s |
| $\dot{Q}_{s,p-g}$ | Strahlungswärmestrom, Plume - Gasschicht | kJ/s |
| q | Energie | kJ/m |
| \dot{q} | Energiestrom dichte | kJ/s·m |

| | | |
|---------------|---|--------------------|
| \dot{R} | Abbrandrate | kg/s |
| R_β | Zufallszahl ($0 \leq R \leq 1$) für β | - |
| r | Verhältnis bei stöchiometrischer Verbrennung Luft/Brennstoff | kgL/kgB |
| r | Abstand | m |
| S_{gl} | gleichwertige Schichtdicke | m |
| S | Energieinhalt eines Energieteilchens | kJ |
| T | Temperatur | K |
| T_a | Temperatur der unteren Luftschicht | K |
| T_c | Deckenoberflächentemperatur | K |
| T_g | Gasschichttemperatur | K |
| T_o | Umgebungstemperatur | K |
| T_p | Plume-Temperatur | K |
| T_w | Temperatur der Wandoberfläche, innen | K |
| t | Zeit | s |
| w | Rauchgasgeschwindigkeit im Brandraum | m/s |
| x | Koordinate | m |
| y | Koordinate | m |
| y_o | Radius des Brandherdes | m |
| z | Koordinate | m |
| α | Absorptionsgrad | |
| α | Wärmeübergangskoeffizient | W/m ² K |
| β | Winkel von der Flächennormalen | - |
| γ | Ebenenwinkel | - |
| δ | Einschnürung der Ausflußhöhe | m |
| ε | Emissionsgrad, Emissionsverhältnis | - |
| λ | Wellenlänge | m |
| λ_w | Wärmeleitfähigkeit der Wand | kJ/s m K |
| ρ | Reflexionsgrad | - |
| ρ_a | Dichte der unteren Luftschicht | kg/m ³ |
| ρ_g | Dichte der Rauchgase | kg/m ³ |
| ρ_o | Dichte der Gase über dem Brandherd | kg/m ³ |
| ρ'_o | Dichte Verhältnis ρ_o/ρ_a | - |
| ρ_p | Dichte der Plume-Gase | kg/m ³ |
| ρ_w | Dichte der Wand | kg/m ³ |
| τ | optische, dichte Durchlässigkeit | - |
| φ | Absorptionszahl | - |
| w | inverse volumetrische Expansion ($1/(1+(H_u/r \cdot c_p \cdot T_a))$) | - |
| ω | Raumwinkel | - |

Indices

| | |
|--------|---|
| a | in den Plume eingesaugt |
| ab | abgeführt |
| alt | Zustand vor dem Berechnungszeitschritt |
| b | Boden, Segment VI |
| d | Decke, Segment V |
| f | Fenster |
| g | Gasschicht, Segment III |
| ges | gesamt |
| i | innen |
| k | konvektiv |
| l | Luftschicht, Segment IV |
| m | vermischt |
| N | Zahl des Segments |
| o | Umgebungszustand |
| p | Plume, Segment II |
| res | resultierend |
| s | Strahlung, schwarz |
| stöch | stöchiometrisch |
| t | Zeit |
| total | Gesamtanteil der eingesaugten Luft im Plume |
| w | Wand |
| zu | zugeführt |
| zusatz | Zusatzluft |

1. Einleitung und Problemstellung

In der DIN 18 232 werden Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) in ihrer Wirkungsweise dargestellt. Ebenso werden Angaben über die Bemessung und den Einbau dieser Anlagen gemacht, um in Räumen, in denen ein Brand abläuft, durch vertikale Rauch- und Wärmeabfuhr eine rauchgasfreie Luftschicht für den Personenschutz zu erhalten.

Für die Anwendung der DIN 18 230 "Baulicher Brandschutz im Industriebau" muß ein Wärmeabzugsfaktor berücksichtigt werden, mit dem die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen in einem Brandraum erfaßt werden. Dieser Wärmeabzugsfaktor hat Einfluß auf die im Brandraum verbleibende Energie und somit ebenso auf das Bauteilverhalten beim Brand. Dadurch wird deutlich, daß durch genaue Kenntnisse über den Einfluß und die Wirkungsweise von Rauch- und Wärmeabzügen nach DIN 18 232 bei unterschiedlichen Brand-situationen ebenso Aussagen zur DIN 18 230 möglich sind.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens "Rauch- und Wärmeabzug bei Bränden" wurden vom Staatlichen Materialprüfamt des Landes Nordrhein-Westfalen in Dortmund Versuche durchgeführt, die Aussagen über die Wirksamkeit von RWA-Öffnungen bei unterschiedlichen Bränden treffen sollen.

Parallel zu den Versuchen sollen begleitende theoretische bzw. rechnerische Untersuchungen durchgeführt werden, um zu einer möglichst großen Verallgemeinerungsfähigkeit der erzielten Ergebnisse zu gelangen.

Hierbei wird auf theoretische Untersuchungen zurückgegriffen, die im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt worden sind. Es liegen dazu Rechenprogramme vor, die für die Problematik der RWA ergänzt werden mußten und mit denen der zeitliche Ablauf eines Brandes simuliert werden kann, wobei die auftretenden Energie- und Massenströme sowie Temperaturfelder beschrieben werden. Das gilt sowohl für die Zustände im Brandraum als auch für die ein- und ausströmenden Gase durch die Ventilationsöffnungen.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die durchgeführten Versuche unter Berücksichtigung der Versuchsparameter nachzurechnen, wobei die einzelnen Energieterme und Massenströme ermittelt werden.

Im folgenden wird ausführlich über die Grundlagen berichtet, die dem Rechenmodell zugrunde liegen. Es wird dabei auf Einschränkungen hingewiesen, die im Rechenprogramm notwendigerweise berücksichtigt werden müssen, da eine allgemeine Darstellung des Brandverlaufs eines natürlichen Brandes in einem beliebigen Raum mit beliebiger Brandlastanordnung zur Zeit nicht möglich ist und lediglich für definierte Brände gelingt.

Des weiteren wird auf die durchgeführten Versuche eingegangen, wobei durch graphische Darstellung zwischen Ergebnissen aus Rechnung und Messung verglichen wird.

Anschließend werden die erzielten Ergebnisse diskutiert, wobei auf Unterschiede in Rechnung und Messung eingegangen wird und ebenso auf mögliche Fehlereinflüsse, die durch Rechnung und Messung hervorgerufen werden können. Abschließend sollen Aussagen zur DIN 18 232 unter Berücksichtigung der Ergebnisse getroffen werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Allgemeines

Trotz des Wissens über die grundsätzlich ablaufenden physikalischen Vorgänge beim Brand wurden verstärkt in den letzten zehn Jahren Untersuchungen veröffentlicht, die zeigen, daß detaillierte Ergebnisse weiterhin notwendig sind. Die Berechnung und Bestimmung der lokalen Brandraumtemperaturen und Wärmeströme in Brandräumen bei natürlichen Bränden und damit ihre Auswirkungen auf das Gebäude sind äußerst komplex und in ihrer vielfältigen Wechselwirkung bis heute noch nicht gelöst. Deswegen wird weiterhin an Brandraummodellen gearbeitet, um unter Einbeziehung neuer theoretischer Ansätze und Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen genauere Parameterabhängigkeiten zu finden. Begünstigt wird diese Entwicklung dadurch, daß in der letzten Zeit immer leistungsstärkere Großrechenanlagen zur Verfügung stehen, mit denen in vertretbarem Rechenaufwand umfangreiche Gleichungssysteme zur Brandsimulation erfaßt werden können. Berücksichtigt werden dabei Ansätze aus der Thermodynamik und Strömungsmechanik für die Bilanzierung der zeitabhängigen Wärme- und Stofftransportvorgänge. Für die Umverteilung der Energien werden die Wärmeleitung und

Konvektion sowie der Wärmestrahlungsaustausch verwendet, die in gegenseitiger Abhängigkeit zu einem sich im Brandraum ausbildenden Strömungsmodell stehen.

National wie international sind Untersuchungen über Brandauswirkungen bekannt, bei denen der Einfluß wie

- Art der Brandlast und deren Verteilung,
- Abbrandgeschwindigkeit und Energiefreisetzung,
- Lüftungsöffnungen

im voll entwickelten Brand behandelt wurde. Weiterhin sind dabei Erfahrungen gesammelt worden, um mit verbesserter Meßtechnik und theoretischen Ansätzen Aussagen über

- Temperaturverteilung,
- Rauchgaszusammensetzung,
- Strömungsbilder in mehrdimensionaler Form und neutraler Ebene

treffen zu können.

Trotz der Vielzahl der untersuchten Brandparameter in den unterschiedlichsten Räumen ist es noch nicht möglich, mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie Brandphänomene im Modell zu simulieren, um allgemein übertragbare Aussagen hinsichtlich der den vollentwickelten Brand beeinflussenden Parameter zu erhalten.

In den letzten Jahren sind in verstärktem Maße die Probleme des Entstehungsbrandes und seiner Ausbreitung in mathematischen Modellen entwickelt worden. Es werden dafür verfeinerte Modellvorstellungen benötigt, für deren mathematische Lösung der Rechenaufwand überproportional ansteigt. Erste Darstellungen und Ergebnisse dieser Brandraummodelle sind von Quintiere [1], Pape and Watermann [2], Tanaka [3], Reeves and McArthur [4] und Mitler [5] vorhanden. Bis auf die Arbeit von Quintiere, der ein statisches Mehrzonenmodell beschreibt, wird das Brandgeschehen dieser diskontinuierlichen Modelle zeitabhängig dargestellt.

Die mathematische Modellierung instationärer, diskontinuierlicher Brandraummodelle gelingt nur, wenn wichtige Teilaspekte des Brandes untersucht worden sind. Deswegen wird auf internationaler Ebene viel Zeit investiert, um wissenschaftliche Detailfragen zu klären. Dazu gehören u. a.

1. die Ausbreitung des Brandes mit seiner zeitlichen wie örtlichen Energiefreisetzung in Abhängigkeit von den umgebenden Bauteilen einschließlich unterschiedlicher Brandgüter,
2. der Plume, d. h. der Ort der Flamme und der aus der Umgebung zugemischten Umgebungsluft - auch als "Entrainment" bezeichnet - als treibender Quellterm, durch den Massen- und Energietransporte hervorgerufen werden, so daß die Strömungsverteilung zu erfassen ist,
3. die Höhe der Gasschicht und ihr Einfluß auf das Bauwerk in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zusammensetzung der Heißgasschicht,
4. die Größe der Öffnungen im Bauwerk und ihr Einfluß auf die dem Brandraum zu- und abgeführten Energie- und Massenströme,
5. der Einfluß der Wärmestrahlung, die wegen der diskontinuierlichen Gas-temperaturverteilung im Brandraum und lokaler Energiequellen einen großen Einfluß auf die differenzierte Beurteilung der pre-flash-over-Phase hat.

Das Problem der Brandausbreitung und der davon abhängigen Abbrandrate ist bisher lediglich für spezielle Anwendungen und Anordnungen untersucht worden und kann nicht verallgemeinert werden. Das Problem ist allerdings für große Brandabschnitte, wie sie der DIN 18 230 und 18 232 zugrunde liegen, bisher nicht untersucht worden.

In [6] werden Ansätze für eine Brandausbreitung berücksichtigt. Es werden Ausbreitungsgeschwindigkeiten vorgegeben und ihre Auswirkungen im Rechenmodell für den voll entwickelten Brand untersucht. Delichatosios [7] beschreibt die Ausbreitung des Feuers an einzelnen Holzkrippen. Quintiere [8] untersucht die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Feuers an Wänden eines Brandraums, wobei die theoretischen Randbedingungen eines Mehrzonenmodells zugrunde liegen. In [4] wird anhand einer mathematischen Modellbildung die

Brandausbreitung in Fahrgastkabinen großer Flugzeuge simuliert. Hier werden lediglich Brände bis zu zehn Minuten untersucht, weil in dieser Zeit entweder das Feuer unter Kontrolle zu bringen ist oder ein Unfall durch Rauchgas-Vergiftungserscheinungen auftritt.

Von entscheidendem Einfluß auf den Brandraum und die Entwicklung des Brandes ist die Heißgasschicht. Die Temperatur, Zusammensetzung und Höhe der Gasschicht hängt ab von den Anordnungen der Öffnungen im Bauwerk, die wiederum Einfluß haben auf Energiefreisetzung und Plume-Verhalten. Eine Vielzahl von Arbeiten untersuchen diese Detailprobleme, die ebenso in den Gesamtbrandraummodellen [1, 2, 3, 5, 7] mit berücksichtigt werden. Die Kenntnis über das zeitabhängige Wachsen der Heißgasschicht mit Rauchbestandteilen ist ein notwendiger Bestandteil für den Rauch- und Wärmeabzug in Gebäuden im Hinblick auf die Norm DIN 18 230 und DIN 18 232. Erste theoretische Beschreibungen dazu sind von Thomas [9] durchgeführt worden, eine Literatursichtung bekannter Modellvorstellungen wurde von Schneider [10] erarbeitet. Die Verteilung von freigesetztem Rauch auf verschiedene Räume wird von Cooper [11] beschrieben.

Grundlegende Detailarbeiten zum Einfluß der Öffnungen auf das "Entrainment" im Plume geben die Arbeiten von Rockett [12] und Quintiere [13] wieder. Prahl und Emmons [14] beschreiben die Einschnürung von ausfließenden Heißgasen durch vertikale Fensteröffnungen in Experiment und Theorie. Zukosi [15] weist auf das Phänomen hin, daß bei bestimmter Gasschichthöhe in vertikalen Öffnungen sofort ein großer Teil der einströmenden Kaltluft in die Heißgasschicht eingewirbelt wird und somit zusätzlich das Temperatur- und Konzentrationsniveau der Heißgasschicht stark verändert. Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen muß diesem Problemkreis starke Beachtung geschenkt werden.

2.2 Brandraummodell

Grundlage des Brandraummodells ist ein rechteckiger Raum mit einer rechteckigen, horizontalen Dachöffnung. Als Ventilationsöffnung und einer Eingangstür, wie es in Bild 1 verdeutlicht wird. Als Feuer wird ein lokaler Brand auf dem Boden des Raumes angenommen.

Der Brandverlauf wird entsprechend den Segmenten in folgende Bereiche gegliedert:

- I Der Brennstoff, in unserem Modell eine Holzbrandlast, die unter bestimmten Bedingungen mit einer Abbrandrate \dot{R} unter Energiefreisetzung verbrannt wird.
- II Die durch die Energiefreisetzung entstandenen Verbrennungsgase steigen aufgrund der Dichteunterschiede zur umgebenden Luft nach oben und vermischen sich zum Teil mit dieser. Hier im Plume verringern sich mit wachsender Höhe die Temperaturen und die Geschwindigkeit der Gase, während sich dagegen die Gesamtmasse und die Dichte erhöhen. Als Annahme gilt, daß die Verbrennung - d. h. der Bereich der leuchtenden Flamme - im Plume abgeschlossen ist und lediglich heiße Gase nach oben gelangen. Die leuchtende Flamme sendet Energie durch Strahlung aus. Die Hauptabstrahlungsrichtung ist die Normale zur Plumeachse.
- III In die Heißgasschicht, die sich wegen der Dichteunterschiede zur Umgebungsluft unter der Brandraumdecke ausbildet, strömt die gesamte Masse der beim Brand entstehenden Rauchgase. Obwohl sich während des Brandes durch die einströmende Luft eine gewisse Schichtung in der Heißgasschicht ausbildet, wird im Modell eine sofortige und vollständige Durchmischung angenommen. Deswegen wird für den Bereich der Gasschicht gleichmäßige Temperatur, Dichte und Zusammensetzung zu jedem betrachteten Rechenzeitschritt vorausgesetzt. Weiterhin wird keine Vermischung mit der darunterliegenden Kaltluft angenommen. In Abhängigkeit von der Abbrandgeschwindigkeit \dot{R} wächst die Gasschicht. Es wird sofort durch die Auftriebskräfte Gas durch die Dachöffnungen gedrückt.
- IV Der Raum unter der Heißgasschicht wird durch normale Umgebungsluft ausgefüllt. Die Luft wird zur Verbrennung in Segment I und II benötigt. Durch die Seitenöffnung strömt Umgebungsluft ein und wird durch Berührung mit der Bodenfläche erwärmt.
- V Die Decke des Brandraums ist die Fläche hinter der Gasschicht des Segments III. Sie setzt sich zusammen aus der Decke des Raumes und den Teilen der Seitenwände, die von der Gasschicht ebenfalls überdeckt wird. Da die Gasschicht in ihrer Höhe von den Ventilationsöffnungen und der Abbrandrate abhängt, verändert sich ebenso die Größe der Segmentfläche V. Die Wärmeverluste durch die Wand werden durch einen

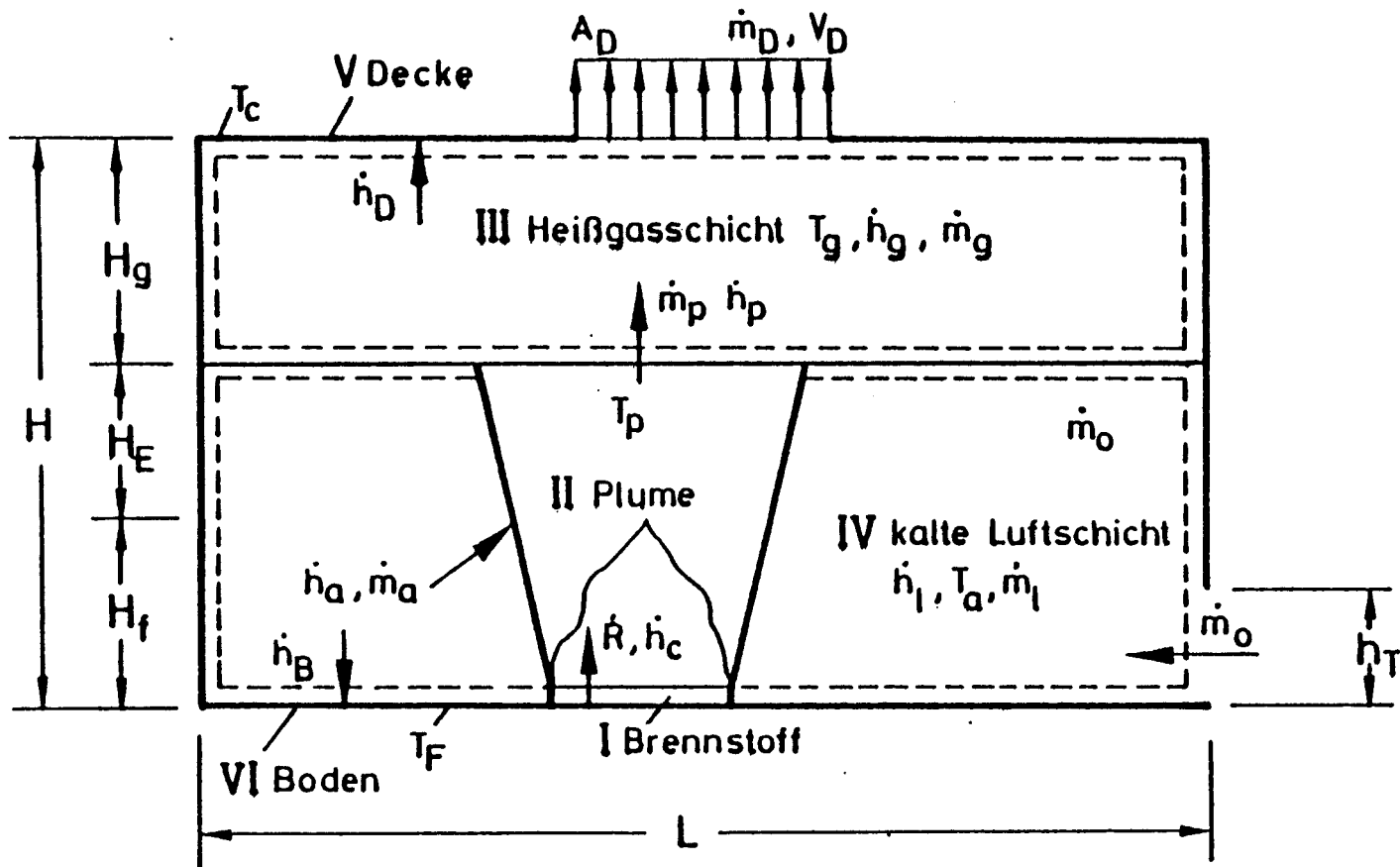


Bild 1: Brandraummodell (Geometrie, Segmente, Massen- und Energieströme)

eindimensionalen Ansatz beschrieben. Die Belastung der Innenoberfläche erfolgt durch Wärmestrahlung, die von allen Segmenten des Brandraums herrühren und von konvektiven Einflüssen zwischen Gas und Wand.

VI Die Bodenfläche des Brandraums ist die Fläche hinter der kalten Luftschicht (Segment IV). Die Aufheizung dieses Segments erfolgt lediglich durch Wärmestrahlung. Durch konvektive Einflüsse zwischen Boden VI und kalter Luftschicht IV wird die Luftschicht erwärmt.

Ziel dieser Brandraummodellierung ist es, die Prozesse zu beschreiben, die in den einzelnen Segmenten ablaufen und ebenso die gegenseitige Beeinflussung der Brandraumsegmente untereinander. Dazu werden die Zustände im Segment durch Gleichungen beschrieben, die untereinander verknüpft sind. Die Zustände im Brandraum werden zeitabhängig dargestellt, so daß die Entwicklung des Feuers, die Abbrandrate, die Temperaturerhöhung, die Änderung der Massenströme und die örtlichen Wärmestromdichten erfaßt werden. Die meisten verwendeten Gleichungen sind vom einfachen algebraischen Typ, einige sind gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung, und zum Aufheizen der Wände werden Differentialgleichungen zweiter Ordnung verwendet.

2.3 Bilanzgleichungen der Brandraumsegmente

In den folgenden Kapiteln werden die physikalischen, den Brand beeinflussenden Parameter dargestellt und abgeleitet. Die Gesamtenergiebilanz des Brandraums wird nicht aufgestellt, da durch die wechselseitige Beeinflussung des Energieaustauschs über die Segmentgrenzen hinweg zu komplexe Abhängigkeiten entstehen würden. So werden über die Erstellung der Energiebilanzen zu den einzelnen Segmenten die Abhängigkeiten deutlich gemacht. Während der rechnerischen Durchführung wird über die Bestimmung der einzelnen Segment-Energiebilanzen die Gesamtbrandraumenergiebilanz ebenso erfüllt. In allgemeiner Form gilt für jedes Segment die Energiebilanz:

$$\frac{d q_N}{dt} = \sum \dot{q}_{N,zu} - \sum \dot{q}_{N,ab} \quad (1)$$

Der erste Term stellt die differentielle Energieänderung des Segments N dar, während die rechte Seite der Gl. (1) jeweils die Summe der zu- und abgeführten Energieströme erfaßt.

Einfacher ist dagegen mit den Massenbilanzen zu verfahren. Durch die Annahmen,

- daß die Temperatur- und Dichteverteilung in den Gassegmenten homogen ist und
- keine gegenseitige Vermischung von Heißgas- und Kaltluftschicht vorhanden ist (der Massentransport erfolgt nur über den Plume),

läßt sich die Massenbilanz für den Gesamtraum allgemein in folgender Form aufstellen:

$$\frac{dm_{ges}}{dt} = \sum \dot{m}_{zu} - \sum \dot{m}_{ab} \quad (2)$$

Der erste Term bedeutet die differentielle Gesamtmassenänderung, wobei diese Masse selbst abhängt von Temperatur und Dichte der einzelnen Segmentmassen. Die Summen der zu- und abfließenden Massenströme sind Massen, die durch die Brandraumöffnungen beeinflußt, und zusätzlich Gase, die durch den Brennstoffumsatz freigesetzt werden.

2.3.1 Energiefreisetzung

Die Grundvoraussetzung für die rechnerische Darstellung eines Brandes ist eine möglichst genaue Erfassung der zeitlichen Energiefreisetzung und damit verbunden die Flammenausbildung sowie die Ausbreitung des Feuers. Die Flamme selbst ist ein inhomogenes, pulsierendes und turbulentes Gebilde, das durch einfache Modelle und Messungen angenähert werden muß.

Für die Energiefreisetzung \dot{h}_c wird u. a. nach [6] der Ansatz

$$\dot{h}_c = \dot{R} \cdot H_u \quad (3)$$

verwendet. Bei kleinen Versuchsräumen konnte rechnerisch für den Brandraum gute Übereinstimmung mit dem Versuch erzielt werden, wenn die Abbrandgeschwindigkeiten verwendet wurden, die in Versuchen gemessen worden sind. Für große Räume liegen dazu aber keine Messungen vor.

Im Rahmen dieser vorliegenden Arbeit werden zwei verschiedene Modelle für die Energiefreisetzung verwendet. Das erste Modell verwendet Gl. (3), wobei die Abbrandrate \dot{R} vorgegeben wird, sei es durch Messung oder durch Erfahrung über das Verhalten einer vorgegebenen Brandsituation. Dazu ist die Kenntnis über den Maximalwert \dot{R}_{max} der Abbrandrate notwendig.

Die zweite Modellvorstellung für die Energiefreisetzung erfaßt die Abbrandrate, so daß sie durch das Rechenprogramm selbst gesteuert wird. Als Steuergröße wird hierbei berücksichtigt, daß die Flammenhöhe durch die Rauchgasschichthöhe begrenzt wird. Es wird lediglich die Abbrandrate zu Beginn des Brandes und \dot{R}_{\max} benötigt.

Grundlage dazu ist eine Arbeit von Steward [16], der aus Versuchsergebnissen von verschiedenen, offenen Feuern über die sichtbare Flammenhöhe den stöchiometrischen Luftverbrauch zuordnet. Dabei wird mit einer Verbrennungszahl N_{CO} , die von der Abbrandrate \dot{R} und den temperaturabhängigen Stoffwerten der Verbrennungsgase abhängt, der Brand und die Vorgänge im Plume darüber bewertet. Für stöchiometrischen Luftbedarf gilt nach theoretischer Ableitung für die Flammenhöhe

$$\frac{H_f}{y_o} / \text{stöch} = 1,49 \left[\frac{N_{CO}}{\pi^2 K^4} \right]^{1/5} \quad (4)$$

Mit H_f als Flammenhöhe und y_o als Radius des Brandherdes. Der Faktor K wird international als "entrainment coefficient" bezeichnet und erfaßt den Anteil der Umgebungsluft, der durch warme aufsteigende Gase mitgerissen und in den Plume eingemischt wird. Die Definition der dimensionslosen Verbrennungskennzahl N_{CO} ist:

$$N_{CO} = \frac{\dot{h}_c^2 (r + \omega/\rho_o')^2}{\rho_a^2 H_u^2 g y_o^5 (1 - \omega)^5} \quad (5)$$

Neben der Flammenhöhe nach Gl. (4) wird zusätzlich Luft vom Plume mitgenommen, bis er in die obere Heißgasschicht des Brandraums einmündet. So wird unter Verwendung von Gl. (4) die vom Plume mit eingesogene Gesamtluft bestimmt aus:

$$\begin{aligned} \frac{H}{y_o} / \text{total} &= \frac{H_f}{y_o} / \text{stöch} + \frac{H_E}{y_o} / \text{zusatz} \\ &= 1,49 \left[\frac{N_{CO}}{\pi^2 K^4} \right]^{1/5} + 0,916 \omega^{1/5} (1 - \omega)^{4/5} ((1+E_x)^{3/5} - 1) \left[\frac{N_{CO}}{\pi^2 K^4} \right]^{1/5} \quad (6) \end{aligned}$$

wobei E_x der zusätzliche Anteil der Luft ist, der zu stöchiometrischer Verbrennung durch die Heißgase mitgezogen wird. Dieser Vorgang stellt sich auf der Strecke H_e (Bild 1) ein, dem Weg von der Flammenoberkante bis zur Heißgasschicht. Eine Herleitung der Gl. (4) - (6) wird nicht gegeben und kann in [16] nachvollzogen werden. Als Hinweis soll lediglich angeführt werden, daß diesem Modell zur Bestimmung der Flammenhöhe und der eingesaugten Luft die notwendigen Ansätze mit Energie-, Massen- und Impulsbilanzen zugrunde liegen unter Verwendung des Prandtlschen Mischungswegansatzes für turbulente Heißgasströme.

Die beiden oben angeführten Modelle haben jeweils Vor- und Nachteile in ihrer Möglichkeit, einen Brand zu erfassen. Mit der Abbrandrate $\dot{R}(t)$ nach Gl. (3) kann eine Brandausbreitung im Raum dargestellt werden, wenn dazu Messungen vorliegen. Auf der anderen Seite ist es aber nicht möglich, in der pre-flashover-Phase Aussagen über die Flammenhöhe und den Luftbedarf zu treffen, wenn ein Brand größerer Ausdehnung beschrieben werden soll. Zusätzlich wird dann ein Ansatz für den Plume und seine Auswirkungen auf den Brandraum notwendig, die aber in den bisher bekannten Formen nicht die Brandausbreitung mit erfaßt.

Im Ansatz von Steward (Gl. 4 - 6) wird dagegen ein Brandherdradius y_0 vorgegeben, der nicht unbegrenzt wachsen kann, weil die theoretische Flammenhöhe nach Gl. (4) durch die Brandraumhöhe H selbst begrenzt ist. Andererseits sind die Ansätze, die zu diesen Gleichungen führen, durch Versuche verifiziert worden und erfassen somit ein gewisses Spektrum realer Brände, die sich allerdings nicht ausbreiten. Es muß weiteren Versuchen und Untersuchungen überlassen werden, inwieweit bisher durchgeführte Brandexperimente auf reale Brandsituationen für große Räume übertragbar sind und welche Brandphänomene hierbei von Bedeutung sind.

Zu Beginn des Brandes wächst der Brennstoffverbrauch linear an. Das gilt jeweils für beide Abbrandmodelle. Die durch den Brand freigesetzte Energie wird nach Gl. (3) bestimmt. Über dem Brandherd verbrennt der Brennstoff mit leuchtender Flamme. In diesem Bereich wird die zur vollständigen Verbrennung notwendige Umgebungsluft eingemischt. Die leuchtende Flamme wird für die rechnerische Ermittlung des Wärmestrahlungsaustauschs als zylinderförmig angesehen.

Nach [2] und [5] liegt der Anteil der abgestrahlten Wärmeenergie durch eine freie brennende Flamme bei 40 % der insgesamt nach Gl. (3) umgesetzten Energie. Mit Hilfe einer Energiebilanz für die freigesetzte Energie, die Flamme und den Plume läßt sich die Flammentemperatur berechnen. Als zusätzliche Größe für die Beurteilung des Brandes wird das Verhältnis der Massen von Luft zu Brennstoff benötigt, um stöchiometrische Verhältnisse zu erhalten.

Für die Anwendung der beiden verschiedenen Modelle ergibt sich folgender Unterschied: Das Abbrandmodell nach Gl. (3) gibt die umgesetzte Energie vor, und in der weiteren Betrachtung entwickeln sich daraus die Reaktionsgrößen wie Temperatur, Geschwindigkeit, Energie- und Massentransport. Die Modellvorstellung einer Kopplung von Abbrandrate und Plumehöhe dagegen ermöglicht in Abhängigkeit von den Ventilationsöffnungen die Abbrandgeschwindigkeit sowie Temperatur und Massenumsatz zu steuern.

Bei Durchsicht der internationalen Literatur werden für die Abbrandrate \dot{R} unterschiedlichste Ansätze verwendet, die aber keine neuen und allgemeingültigen Zusammenhänge über den Verlauf eines Brandes erhalten. Mitler [5] verwendet Ansätze für die Abbrandrate, die halbempirisch aus Brandversuchen gefunden werden. Diese Versuche wurden im Freien durchgeführt und anschließend die Randbedingungen des Raumbrandes mit einbezogen. Pape [2] gibt eine Verteilung von \dot{R} an, die von einer linearen über eine experimentelle und asymptotische Phase in den Bereich des flash-over-Bereichs mündet. Dies sind jedoch Annahmen, die nur zum Teil durch Messungen bestätigt worden sind und außerdem nicht für alle natürlichen Brände gelten.

2.3.2 Plume-Einfluß

In direkter Abhängigkeit von der Energiefreisetzung und als Reaktion auf den Verbrennungsvorgang entsteht der Plume. Es ist der Bereich direkt über dem Feuer, in dem der Ausbrand der noch vorhandenen brennbaren Bestandteile mit leuchtender Flamme vor sich geht, und hier wird ebenso Luft aus der Umgebung in diesen Bereich eingesogen. Die im Plume vorhandene Luft wird durch die Anteile bestimmt, die einmal zur Verbrennungsreaktion benötigt und andererseits zusätzlich von den heißen, aufsteigenden Rauchgasen aufgrund der Dichteunterschiede mit nach oben gerissen werden. Während des Aufsteigens vermischt sich die Luft mit den Rauchgasen, so daß mit steigender Höhe ein größerer Massentransport stattfindet, wobei die Temperatur abnimmt und die Dichte wieder ansteigt.

Zur Darstellung dieses physikalischen Problems sind viele Arbeiten im internationalen Rahmen durchgeführt worden. Erste theoretische Ansätze wurden von Schmidt [17] erarbeitet. Auf der Arbeit von Yik [18] basieren die Untersuchungen von Yokoi [19] und Thomas [9]. Allen diesen Arbeiten ist gemein, daß die Energiefreisetzung mit einer punktförmigen Quelle dargestellt wird. Die analytische Lösung des Problems erfolgt unter Verwendung folgender Annahmen, daß

- das ideale Gasgesetz gelte,
- Temperatur und Druck konstant sei und
- der Prandtlsche Mischungslängenwegansatz für turbulente Strahlen gelte.

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden zwei verschiedene Darstellungen für den Plume verwendet. Die erste wird durch die Gleichungen (4) - (6) erklärt und basiert auf den Untersuchungen von Steward [16]. Dieses Modell wurde schon in Kapitel 2.3.1 beschrieben, weil es nur in Verbindung mit der Energiefreisetzung dargestellt werden kann.

Als zweites Modell des Plume wird der Ansatz nach Zukoski [15] verwendet. Der Massenstrom \dot{m}_a der Luft, der bei turbulenter Aufwärtsströmung mit in den Plume eingemischt wird, wird durch

$$\dot{m}_a = \rho_a \sqrt{g \frac{\rho_a - \rho_p}{\rho_a}} [\pi C_v C_e^2]^{3/2} H_p^{5/2} \quad (7)$$

bestimmt. Die dimensionslosen Beiwerte C_v und C_e erfassen dabei den Geschwindigkeitseinfluß des Gases sowie die Höhe des Plumes.

Als zusätzliche Voraussetzung für die Herleitung von Gl. (7) gilt, daß

- das Verhältnis von Plumehöhe/Durchmesser des Feuers groß ist,
- die Dichteunterschiede zwischen Plumegasen und Umgebungsluft klein sind,
- eine Punktquelle vorliegt, in der kein Brennstoff umgesetzt wird.

Die Verwendung von Gl. (7) zeigt beim Vergleich von Rechnung und Messung in kleinen Brandräumen gute Ergebnisse, kann aber keine mit großem Brennstoffumsatz brennende Flamme erfassen, da weder die Abbrandrate \dot{R} , die Flammenhöhe noch der Brandherddurchmesser berücksichtigt werden.

In beiden Modellen (Gl. 6 und 7) wird über der Höhe H_p des Plumes ein konstanter "Entrainment"-Koeffizient K für die mitgezogene Umgebungsluft berücksichtigt. In Gl. (7) ist dieser Beiwert K in die vorgegebenen Konstanten C_v und C_e

eingebaut. Über die Größe des Beiwertes K (Gl. 6) gibt es die unterschiedlichsten Angaben in der Literatur. In den vorliegenden Untersuchungen wird ein Wert $K = 0,25$ verwendet, der durch neuere Arbeiten für lokale Brände dieser Raumgröße gefunden wurde.

Zur Darstellung der ablaufenden physikalischen Vorgänge im Plume, d. h. Segment II in Bild 1, werden die Massen- und Energiebilanz benötigt. Die allgemeine Form der Massenbilanz lautet:

$$\dot{m}_p = \dot{m}_a + \dot{R} \quad (8)$$

Es wird dabei vorausgesetzt, daß der gesamte Massentransport von Rauchgasen und Luft aus Segment IV über den Plume bewirkt wird. Der Massenstrom \dot{m}_p stellt die Gesamtmasse des Gemisches aus den Verbrennungsgasen und eingemischter Umgebungsluft vor Eintritt in die obere Heißgasschicht dar. Der Gesamtluftmassenstrom im Plume ist

$$\dot{m}_a = \bar{\dot{m}}_a + \dot{m}_v \quad (9)$$

wobei $\bar{\dot{m}}_a$ der über Gl. (6) und (7) bestimmbare Luftmassenstrom ist, der über der Plumehöhe von den aufsteigenden Rauchgasen mitgerissen wird. \dot{m}_v ist der Luftmassenstrom, der maximal bei stöchiometrischer Verbrennung der Abbrandrate \dot{R} benötigt wird.

$$\dot{m}_v = \dot{R} \cdot r \quad (10)$$

Unter Verwendung der Gl. (8), (9) und (10) lautet die Energiebilanz dazu:

$$\dot{R} \cdot H_u = (\bar{\dot{m}}_a + \dot{m}_v + \dot{R}) c_{p,p} (T_p - T_a) + \dot{Q}_{S,F} \quad (11)$$

Die spez. Wärmekapazität der Plumegase $c_{p,p}$ wird als Mittelwert des Eintritts- und Austrittszustandes der Gase in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Diese Werte ändern sich in Abhängigkeit der prozentualen Anteile der Verbrennungsrückstände im Rauchgas. Die Rauchgase müssen während eines Brandversuchs auf ihre Zusammensetzung hinsichtlich Kohlendioxyd- und Wasseranteil untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Rauchgasbestandteile von 11 % CO_2 und 11 % H_2O angenommen, was eine stöchiometrische Verbrennung voraussetzt.

Wichtig wird die Rauchgaszusammensetzung bei Bestimmung des Wärmestrahlungsaustausches im Raum, weil speziell die Komponenten zwei- und mehratomiger Gase

wie CO_2 und H_2O Wärmestrahlung absorbieren können. Somit tragen sie zum gerichteten Wärmetransport bei, da sich die heißen Rauchgase unter der Brandraumdecke sammeln.

Der von der Verbrennungszone abgestrahlte Wärmestrom $\dot{Q}_{S,F}$ (Gl. 11) wird mit 40 % der insgesamt freigesetzten Energie angenommen. Dieser Wert stellt eine gute Näherung nach [2] und [5] dar, wenn die Flammentemperatur zwischen 800 und 1200 K liegt.

Zu bestimmen sind die Strahlungsanteile, die in Abhängigkeit von der sich verändernden Geometrie, d. h. bei wechselnder Heißgasschichthöhe, in den einzelnen Raumsegmenten absorbiert werden. Mit den vorhandenen Angaben kann die Plumentemperatur T_p aus Gl. (11) ermittelt werden. Die Bestimmung erfolgt iterativ, da die verwendeten Stoffwerte von der Temperatur T_p selbst abhängen und über Gl. (5) ebenso die Abbrandrate \dot{R} beeinflussen.

2.3.3 Rauch- und Heißgasschicht

Die Rauch- und Heißgasschicht ist der Ort, in dem sich die gasförmigen Verbrennungsrückstände sammeln. Sie gelangen nur über das Transportmittel "plume" dorthin. Der Zustand der sich unter der Decke ausbildenden Heißgasschicht wird durch verschiedene Quellen und Senken von Wärme- und Massenfluß im Brandraum beeinflusst. Zur Beschreibung der zeitlichen und geometrischen Zustandsänderung der Gasschicht sind die Energie- und Massenbilanzen notwendig.

Für die Massenbilanz sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen: In die Heißgasschicht strömt der Massenanteil \dot{m}_p über den Plume nach Gl. (8) und verliert den Massenanteil \dot{m}_e aus den Öffnungen des Brandraums. Dieser Massenverlust setzt sich zusammen aus

$$\dot{m}_e = \dot{m}_f + \dot{m}_d \quad (12)$$

wobei seitliche Fenster (Index f) und Dachöffnungen (Index d) zu unterscheiden sind. Der allgemeine Zusammenhang für den Masseninhalt m_g der Heißgasschicht ist

$$m_g(t) = \int_0^t \dot{m}_g(t) dt = \int_0^t (\dot{m}_p - \dot{m}_e) dt \quad (13)$$

Die Voraussetzungen zur Ermittlung der zeitlich ausströmenden Massenanteile werden später erläutert.

Bei Anwendung der Energiebilanz steigt der Aufwand der Berechnung mit der Anzahl der Brandraumsegmente, d. h. der Güte des Brandraummodells. Jedes Brandraumsegment beeinflusst durch Wärmestrahlung die Heißgasschicht und erhält andererseits abgestrahlte Wärme von der Gasschicht. Die konvektiv einfließenden Energien der Plume bestehen aus Rauchgasbestandteilen und mitgesogener Umgebungsluft des Verbrennungsvorgangs (Gl. 8 und 9). Für die temperaturabhängigen Stoffwerte der Plumegase wird eine mittlere Plumetemperatur wie in Gl.(11) verwendet.

Die Energieverluste der Gasschicht werden u. a. durch die Massenverluste nach Gl. (12) hervorgerufen, wobei angenommen wird, daß die Stoffwerte dieser Gase durch die zu bestimmende Heißgasschichttemperatur T_g beeinflußt werden.

Als weitere Wärmesenke sind die Flächen des Brandraums hinter der Heißgasschicht (Segment V nach Bild 1) anzusehen, sofern die Heißgastemperaturen T_g größer sind als die der Deckenoberflächen T_c . In diesem Bereich gibt die Heißgasschicht konvektiv und durch Wärmestrahlung Energien an die Wand ab.

Unter Verwendung dieser Annahmen lautet die zeitabhängige Energiebilanz für die Heißgasschicht:

$$\int_0^t \dot{m}_g(t, T) \cdot c_{p_g}(T) \cdot T_g dt = \int_0^t (\dot{Q}_{g, zu} - \dot{Q}_{g, ab}) dt \quad (14)$$

Die Summe der Energieströme, die der Gasschicht nach Gl. (14) zugeführt werden, setzt sich zusammen aus

$$\dot{Q}_{g, zu} = \dot{Q}_{s, b-g} + \dot{Q}_{s, d-g} + \dot{Q}_{s, g-g} + \dot{Q}_{s, p-g} + \dot{Q}_{k, p-g} \quad (15)$$

Die vier ersten Terme der rechten Seite in Gl. (15) stellen Energieströme dar, hervorgerufen durch Wärmestrahlung (Index s). Der letzte Index stellt jeweils den Auftreffpunkt und der mittlere Index den Ausgangspunkt der transportierten Energie dar. So bedeutet z. B. p-g, daß Energie transportiert wird vom Segment "Plume" zum Segment "Gasschicht".

In Gl. (15) wird berücksichtigt, daß Energie, die von der strahlenden Gasschicht ausgesandt wird, wiederum von ihr selbst absorbiert wird. Die Absorptionsfähigkeit der Gasschicht steigt mit der Dicke der Schicht und wirkt somit als Speicher.

Nach den Voraussetzungen des Brandraummodells (Kap. 2.2) wird der Brennstoff auf dem Boden (Segment I nach Bild 1) nicht als eigenständige Strahlungsquelle angesehen, sondern wirkt nur mit Segment II, dem Plume, in dem der Brennstoff mit leuchtender Flamme umgesetzt wird. Hinsichtlich der Wärmestrahlung wird Segment IV als diatherm angesehen und wird deswegen durch Wärmestrahlung nicht beeinflusst.

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{k,p-g}$ in Gl. (15) ist der durch Auftriebskräfte in die Heißgasschicht hineingetragene Rauchgasstrom \dot{m}_p im Plume, beeinflusst durch die thermischen Bedingungen des Verbrennungsprozesses.

Die von der Gasschicht an die Umgebung abgegebenen Energieströme (Gl. 14) sind:

$$\dot{Q}_{g,ab} = \dot{Q}_{s,g,ab} + \dot{Q}_{k,g-d} + \dot{Q}_{k,g-e} \quad (16)$$

wobei die konvektiven Terme an Decke und durch Wandöffnungen von entscheidendem Einfluß sind.

Die Ermittlung der notwendigen Massen- und Energieterme zur Erfüllung der Bilanzen in Gl. (13) und (14) werden später behandelt. Dabei wird die Bestimmung der Wärmestrahlungsanteile mit dem Monte-Carlo-Verfahren ausführlich behandelt.

2.3.4 Untere Luftschicht

Der Raum, den nicht die Heißgasschicht und der Plume einnehmen, wird durch Segment IV, der kalten Luftschicht, erfaßt (Bild 1). In diesem Bereich sammelt sich die zur Verbrennung notwendige Luft. Die Höhe dieser Luftschicht beeinflusst den Umsatz der Rauchgase, da in Abhängigkeit von der Höhe in die nach oben fließenden Heißgase mitgesogene Luft mit eingemischt wird. Die Luftschicht entsteht in Größe und Zusammensetzung nur als Reaktion zu der sich im Brandraum ausbildenden Heißgasschicht, die wiederum durch die Ventilationsöffnungen in der Decke beeinflusst wird. Die zu- und abgeführten Massen und Energien werden durch die Massen- und Energiebilanzen für diesen Teil des Brandraums erfaßt.

Bei Anwendung der Massenbilanz werden folgende Einflüsse berücksichtigt:

Die Luft \dot{m}_a , die durch den Plume (Gl. 9) nach oben transportiert wird, setzt sich zusammen aus der Luft für die Verbrennung des Brennstoffs und der Luft, die mitgesogen wird. Die in das Segment einfließenden Massen gelangen durch seitliche Wandöffnungen in den Brandraum und haben die Temperatur T_o der Umgebung. Durch den Brand umgesetzter, gasförmiger Brennstoff gelangt nicht in Segment IV. Die Massenbilanz für die Luftschicht lautet:

$$m_l(t) = \int_0^t \dot{m}_l(t) dt = \int_0^t (\dot{m}_o - \dot{m}_a) dt \quad (17)$$

Die Erfüllung von Gl. (17) kann nur mit Gl. (13) erfolgen, da die gesamte Luft- und Gasmenge im Brandraum erfaßt werden muß. Ist in der Heißgasschicht zur Zeit t der Zustand von Masse und Temperatur bekannt, wird über die Zusatzbedingungen

$$H_l = H - H_g \quad (18)$$

für den gesamten Brandraum, die Höhe der Luftschicht H_l und somit die Massen m_l der unteren Luftschicht ermittelt. Unter diesen Voraussetzungen kann nach Gl. (17) der Massenstrom \dot{m}_o der einfließenden Kaltluft errechnet werden.

Für die dazugehörige Energiebilanz wird berücksichtigt, daß die kalte Luftschicht keine Wärmestrahlung absorbiert, da sie die Komponenten Wasserdampf und Kohlendioxyd als Strahlungsquelle enthält.

$$\int_0^t \dot{m}_l(t, T) \cdot c_{pl}(T) \cdot T_a dt = \int_0^t (\dot{Q}_{k, b-l} + \dot{Q}_o - \dot{Q}_a) dt \quad (19)$$

Die Luftmassen m_l werden nur indirekt aufgeheizt, indem die Brandraumbodenfläche durch Wärmestrahlung erhitzt wird und danach konvektiv der unteren Luftschicht den Wärmestrom $\dot{Q}_{k, b-l}$ zuführt. Der Energieinhalt der einströmenden Umgebungsluft wird sehr klein sein und bei Erwärmung der Luftschicht in Abhängigkeit vom umgesetzten Brennstoff und den Ventilationsöffnungen verstärkt zur Abkühlung der unteren Luftschicht beitragen.

Die Terme der Bilanzgleichungen der Gl. (12) bis (19) sind nicht einzeln zu bestimmen. Sie lassen sich lediglich aus der Erfassung aller aufgeführten Einflußgrößen ermitteln, da ein gegenseitiges Wechselspiel der Beeinflussung im Brandraum stattfindet.

2.3.5 Umfassungsbauteile

Zur Vereinfachung des Gesamtbrandraummodells werden die Umfassungsbauteile in zwei Segmente aufgeteilt, die getrennt zu untersuchen sind:

1. Segment V: Die Decke besteht aus der Decke des Brandraums selbst und den Seitenwänden, die von der Heißgasschicht der Höhe H_g bedeckt sind.
2. Segment VI: Der Boden besteht aus der Brandraumoberfläche und den nicht von der Heißgasschicht bedeckten Seitenwänden.

Die Beeinflussung der Umfassungsbauteile erfolgt lediglich durch thermische Beanspruchung, und deswegen genügen Wärmebilanzen zur Erfassung der Vorgänge in den Wänden. Um die Temperaturverteilung in der Wand und damit die aus dem Brandraum abgeführte Energie zu bestimmen, sind die Übergangsbedingungen auf beiden Seiten zu ermitteln. In allgemeiner Form gilt die Energiebilanz sowohl für die Decke als auch für den Boden.

$$c_w \cdot \rho_w \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (20)$$

Gl. (20) stellt die Fourierrechnung der Wärmeleitung in einer ebenen Wand in eindimensionaler Schreibweise dar. Die Koordinate x beschreibt die Normalenrichtung zur Wandoberfläche. Die Stoffwerte in Gl. (20) sind bei genauen Betrachtungen temperatur- und ortsabhängig.

Die Lösung der instationären Gl. (20) kann nur erfolgen, wenn die entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen bekannt sind. Um den mathematischen Aufwand zur Lösung der Differentialgleichung (20) nicht zu groß werden zu lassen, wird die Wanddicke des Brandraums segmentiert, so daß in jedem Segment mit konstanten Stoffwerten und Temperaturen gerechnet werden kann.

Die Randbedingungen für Gl. (20) werden durch das Brandgeschehen vorgegeben. Auf der Brandraumseite wird ein resultierender Wärmestrom \dot{Q}_{res} bestimmt. Für das Segment Decke gilt (analog dazu für den Boden (Index b)):

$$\dot{Q}_{d,res} = \dot{Q}_{d,zu} - \dot{Q}_{d,ab} \quad (21)$$

Als zu- und abgeführte Energien sind zu berücksichtigen:

$$\text{Decke: } \dot{Q}_{d,res} = \dot{Q}_{s,b-d} + \dot{Q}_{s,p-d} + \dot{Q}_{s,g-d} + \dot{Q}_{d-d} + \dot{Q}_{k,g-d} - \dot{Q}_{s,d,ab} \quad (22)$$

$$\text{Boden: } \dot{Q}_{b,res} = \dot{Q}_{s,d-b} + \dot{Q}_{s,p-b} + \dot{Q}_{s,g-b} + \dot{Q}_{b-b} + \dot{Q}_{k,b-l} - \dot{Q}_{s,b,ab} \quad (23)$$

In Gl. (22) und (23) werden hauptsächlich Wärmeströme durch Strahlung berücksichtigt. Lediglich die Decke nimmt aus der Gasschicht konvektiv Wärme auf, und der Boden gibt konvektive Wärme an die Luftschicht ab. Einmal wegen der Form der Segmente "Decke" und "Boden" und andererseits aus Gründen der physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wärmestrahlung beeinflussen sich diese Segmente selbst durch ihre eigene abgestrahlte Wärme.

Auf der Außenseite der Wände wird die Abgabe durch Konvektion und Strahlung berücksichtigt. Vorgreifend soll aber erwähnt werden, daß die Temperaturerhöhung an den Außenwänden sehr gering ist und somit kaum Fehlerquellen durch die Wahl des Wärmeübergangskoeffizienten und der Bestimmung der Abstrahlung auftreten können.

2.4 Bestimmung der Energie- und Massenänderung

In diesem Abschnitt werden die physikalischen Ansätze und - wenn notwendig - die Ableitungen angegeben, die in den Bilanzgleichungen verwendet worden sind. Untersuchungen über Detailbrandphänomene sind zum Teil in Schweden und den USA mit Messungen durchgeführt worden. Theoretische Ansätze, sofern sie vorhanden sind, wurden fast nur in den USA erarbeitet. Größtenteils sind die theoretischen, physikalischen Grundlagen im Labormaßstab verifiziert worden, so daß ihre Übertragbarkeit auf reale Brandräume zum Teil Schwierigkeiten bereiten, weil die Wechselwirkungen eines Brandes im Brandraum nicht immer mit einzubeziehen sind.

2.4.1 Konvektive Energien

2.4.1.1 Plume-Gasschicht

Der Brandherd steht nur über den Plume mit der Heißgasschicht in Verbindung, wenn konvektiv Energie übertragen wird. Der Zustand des Plume vor der Heißgasschicht muß deshalb berechnet werden. Zu bestimmende Größen sind:

- Plumetemperatur T_p ,
- Stoffwerte wie Dichte und spez. Wärmekapazität als temperaturabhängige Größen,
- Massenstrom \dot{m}_p ,
- Energie, vom Plume transportiert, \dot{h}_p .

Mit diesen Werten kann durch Vermischen mit der Heißgasschicht die Erwärmung der Gase unter der Decke berechnet werden.

Unter Verwendung der Energiebilanz (Gl. 11) wird die Plumetemperatur erfaßt. Da die Stoffwerte der Rauchgase temperaturabhängige Größen sind, kann eine Lösung nur iterativ gefunden werden. Als Voraussetzungen zur Berechnung gelten die Annahmen in Kap. 2.3.2. Als Plumetemperatur wird eine mittlere Temperatur ermittelt, die für die gesamte Plumehöhe gilt. Die spez. Wärmekapazität wird zwischen Eingangs- und Ausgangszustand der Rauchgase gemittelt.

$$c_{p_p} = (c_p(T_a) - c_p(T_p))/2 \quad (24)$$

Für die Dichtebestimmung wird bei vollständiger Verbrennung mit guter Näherung das ideale Gasgesetz verwendet.

Allgemein muß zur Genauigkeit erwähnt werden, daß die Vorgänge im Plume äußerst komplex sind, weil hier die Verbrennung mit stattfindet. Die Vorgänge in der Flamme selbst sind abhängig von dem Reaktionsweg des Brennstoffs, der Ein- und Vermischung mit Sauerstoff, den turbulenten Geschwindigkeitsverteilungen und Strömungsfeldern, der Druck- und Temperaturverteilung, so daß eine geschlossene Lösung noch nicht vorliegt [20] und deswegen hier bei der Berechnung der Plumetemperatur auf eine Mittelwertbildung zurückgegriffen wird. In dem nach Gl. (6) verwendeten Ansatz für den Brennstoffumsatz und die Plumehöhe wird daher sinnvollerweise unterschieden zwischen dem Bereich der stöchiometrischen Verbrennungszone und dem darüber liegenden Bereich der zusätzlichen Lufteinmischung.

Mit dem Eintrittszustand der Plumegase in die Heißgasschicht sind Energie- und Massenzuwachs bekannt. Es wird vorausgesetzt, daß dieser sich sofort mit der Gasschicht vermischt und somit eine neue homogene Temperaturverteilung in einem veränderten Gasvolumen entsteht.

Für die Erfassung des Gaszustandes wird die Vermischungstemperatur zwischen zwei Zeitschritten iterativ berechnet aus

$$T_{gm} = \frac{m_{g,alt} \cdot c_{p_{g,alt}} (T_{g,alt} - T_o) + m_p \cdot c_{p_p} (T_p - T_o)}{m_{gm} \cdot c_{p_{gm}}} + T_o \quad (25)$$

und die Gasschichthöhe zu

$$H_{gm} = m_{gm} / \rho_{gm} \cdot B \cdot L \quad (26)$$

Die Mischtemperatur und die Gasschichthöhe sind Näherungen und dienen der Abschätzung des Zustandes, wenn die Massenbilanz (Gl. 13) und die Energiebilanz (Gl. 14) erfüllt werden. Zusätzlich müssen für die Bilanz der Gasschicht der Massenverlust durch die Dachentlüftung sowie die Energieabgabe an die Umfassungsbauteile berücksichtigt werden.

2.4.1.2 Gas- und Luftschicht-Umfassungsbauteil

Im Brandraum werden konvektiv Energien ausgetauscht sowohl zwischen Gasschicht und Deckensegment als auch zwischen Bodensegment und unterer Luftschicht. Diese Energieänderung an der Innenoberfläche der Wände wirkt sich zeitlich auf die Temperaturverteilung in der Wand aus. An der Außenseite wird nach genügend langer Branddauer ebenfalls konvektiv Wärme an die Umgebung abgegeben. Der Wärmeübergang zwischen Gas und Wand wird durch die Bedingung

$$\dot{Q}_{g-w} = \alpha A (T_g - T_w) \quad (27)$$

beschrieben. Die Schwierigkeit in der Anwendung von Gl. (27) liegt in der Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α .

In der Literatur werden zum Teil stark voneinander abweichende α -Werte für den Brandinnenraum verwendet. Lediglich an der Außenwand werden Werte angegeben, die in der gleichen Größenordnung liegen. Im Rechenmodell wird der Wert

$$\alpha_o = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (28)$$

verwendet.

Für den Brandraum wird die Bestimmung von α_i schwierig, da einmal horizontale und vertikale Flächen vorhanden sind und andererseits sich Strömungsprofile und damit Geschwindigkeiten aufgrund des Brandgeschehens und der Lage der Ventilationsöffnungen ausbilden, die nur schwer theoretisch erfaßt werden können.

Die in der Wärmeübertragung verwendeten Ansätze [21] über freie Konvektion an senkrechten Platten erfassen das Brandphänomen nicht eindeutig und ergeben zu geringe Werte. Mitler [5] gibt an, daß zu Beginn des Brandes α_i linear ansteigt und, nachdem die Temperaturdifferenz $T_g - T_o > 100 \text{ K}$ geworden ist, einen Maximalwert $\alpha_i = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht. Dieser Maximalwert erscheint allerdings zu groß zu sein und entspricht nicht den Erkenntnissen, die an der TU Braunschweig gewonnen wurden.

In [22] wird folgende Beziehung verwendet:

$$\alpha_i = (7,38 + 0,00224 \cdot (T_g - 273)) \cdot w^{0,5} \quad (29)$$

wobei die Strömungsgeschwindigkeit w der Rauchgase im Brandraum berücksichtigt wird. Das erscheint der richtige Weg für die Ermittlung eines α_i . Über die Bestimmung der Rauchgasgeschwindigkeiten hinsichtlich des natürlichen Brandes gibt es keine Untersuchungen, die mit einzubeziehen sind. Abhilfe kann dafür in naher Zukunft erwartet werden, da im Rahmen der Untersuchungen des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen" in Braunschweig u. a. Geschwindigkeiten bei natürlichen Bränden im Brandraum mit erfaßt werden sollen. Andererseits erscheinen die in [22] ermittelten Werte etwas zu groß, da sie über ein wassergekühltes Wärmestromdichte-Meßgerät während der Versuche in Metz [23] ermittelt und mit den der Gl. (29) zugrunde liegenden Ansätzen verknüpft wurden. Ein wassergekühltes Wärmestromdichte-Meßgerät zeigt immer einen Maximalwert an, weil die Temperaturdifferenzen zwischen Brandraum und Wasser größer sind als zwischen Brandraum und Wandoberfläche, so daß ein größeres Potentialgefälle wirksam werden kann und zu große Wärmestromdichten berechnet werden.

In der vorliegenden Brandraummodellierung werden daher Werte

$$\alpha_i = 10 - 15 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (30)$$

sowohl für die obere Gasschicht als auch in der unteren Luftschicht verwendet.

Es bleibt abzuwarten, ob zukünftige Untersuchungen eindeutige und ausreichende Aussagen für die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten während des Brandgeschehens erbringen.

2.4.1.3 Wandöffnungen - Brandraum

Im Gegensatz zu den Brandraummodellen mit homogener Gastemperaturverteilung im ganzen Brandraum [6, 1, 24], bei denen das physikalische Problem der neutralen Ebene als Ersatz für den Übergang zwischen Heißgasschicht und Kaltgasschicht verwendet wird, kann bei Brandraummodellen mit mehreren Gasschichten in vertikaler Richtung mit eindeutig definierter Heißgasschichthöhe gerechnet werden.

Die Gleichung der Massenbilanz für den Brandraum wird durch

$$\dot{m}_D - (\dot{m}_O + \dot{R}) = 0 \quad (31)$$

gegeben (Bild 1). Gl. (31) gilt für jeden beliebigen Brandraum.

Für die Ermittlung der Energie- und Massenströme der Rauchgase, die den Brandraum über die Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen in der Decke verlassen, wird ein dynamisches Gleichgewicht nach der Bernoulli-Stromfadentheorie für reibungsfreie Medien angesetzt. Weiterhin gilt an der Grenzschicht zwischen Heiß- und Kaltgasschicht, daß hier die Geschwindigkeiten gleich Null sind, d. h. die Druckverhältnisse gleich sind. Daraus wird, wie in der Literatur nachzuvollziehen ist, in Abhängigkeit von der sich zeitlich verändernden Geometrie der Rauchgase und der temperaturabhängigen Stoffwerte der Gase der Massenausfluß bestimmt.

Die ausfließende Heißgasrate aus den Dachöffnungen wird durch folgende Beziehung ermittelt.

$$\dot{m}_D = c \cdot A_D \cdot \rho_g \cdot (2 \cdot g \cdot (\rho_o - \rho_g) / \rho_g)^{1/2} \cdot H_g \quad (32)$$

Gl. (32) wird auch von Thomas [9] verwendet, so daß zu ihrer Ermittlung keine Versuche notwendig sind, da sie allein aus der Theorie abgeleitet wurde.

Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang die Ermittlung des Kontraktionskoeffizienten c (Gl. 32), der in DIN 18 232 Einfluß auf die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der Rauchabzüge hat. In dem hier beschriebenen Modell wird für $c = 0,6$ verwendet.

2.4.2 Wärmeleitung in die Umfassungsbauteile

Neben der Erfassung der Brandvorgänge im Brandraum müssen die Auswirkungen des Brandes auf die Umfassungsbauteile einbezogen werden. Einmal wird die Berücksichtigung notwendig, um den Verbleib der freigesetzten Energien zu erfassen und die Energiebilanzen zu erfüllen, und andererseits wird die Standfestigkeit eines Gebäudes stark durch thermische Belastung beeinflusst und muß somit bekannt sein.

In Kap. 2.3.5 sind die Bilanzgleichungen (21) bis (23) angegeben, die als Randbedingungen notwendig sind, um die Fourier-Gleichung der Wärmeleitung in der ebenen Wand (Gl. 20) zu lösen. Für alle vorgestellten Rechenergebnisse liegt zugrunde, daß die Umfassungsbauteile aus Schamotte von 0,3 m Wandstärke bestehen. Die Wand wird zur Erfassung der Temperaturverteilung über der Wanddicke in 15 gleich starke Segmente aufgeteilt. Die Berechnung des Temperaturfeldes in der Wand erfolgt nach der Methode der konzentrierten Parameter [25]. In jedem Segment wird über der Segmentdicke mit konstanten Parametern hinsichtlich der Stoffwerte und Temperaturen gerechnet.

Als Lösungsansatz wird für jedes Segment eine Energiebilanz aufgestellt. Sie lautet in allgemeiner Form:

$$\dot{Q}_{N-1,N} - \dot{Q}_{N,N+1} = c_{w,N} \rho_{w,N} \Delta x \cdot A_{w,N} \frac{T_{N,t} - T_{N,alt}}{\Delta t} \quad (33)$$

mit

$$\dot{Q}_{N,N+1} = \lambda_{w,N} A_{w,N} \frac{T_{N,t} - T_{N+1,t}}{\Delta x} \quad (34)$$

Bei Anwendung von Gl. (33) und (34) für jedes Wandsegment N ergibt sich ein System von N -linearen Gleichungen mit N unbekannten Wandsegmenttemperaturen $T_{N,t}$. Die Lösung erfolgt mit vorhandenen Rechnerunterprogrammen (Grundlage dazu: Lösung von Gleichungssystemen in der numerischen Mathematik).

In Gl. (33) werden für das erste innen liegende Segment die Randbedingungen nach Gl. (22) und (23) und auf der außen liegenden Seite einfache Ansätze von Strahlung und Konvektion verwendet, da durch die Gesamtwanddicke und die Dauer der Brände der Außenbereich der Wände gar nicht oder nur leicht erwärmt wird.

Das in den Gl. (33) und (34) beschriebene Verfahren ist lediglich eine Darstellung der Fourier-Gleichung der Wärmeleitung in Differenzenschreibweise. In das Rechenprogramm können jederzeit orts- und temperaturabhängige Stoffwerte eingebaut werden, so daß sich das Temperaturprofil in dem Umfassungsbauteil entsprechend ermitteln läßt. Ausschlaggebend sind für das Verhalten eines jeden Materials die Energien, die als resultierende Größen - Gl. (22) und (23) - die Oberfläche eines Baustoffs belasten. So hat die Wärmeleitung eines Materials entscheidenden Einfluß auf die Oberflächentemperatur dieses Materials, weil z. B. durch schlechte Wärmeabfuhr im Inneren die an der Oberfläche angebotene Energie in eine Oberflächentemperaturerhöhung umgesetzt wird. Dieses hat wiederum Auswirkungen auf die Wärmestrahlungsintensität, besonders dann, wenn in einem Brandraum starke Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Brandraumsegmenten bestehen.

2.4.3 Wärmestahlungsenergie

In Brandraummodellen, die in vertikaler Richtung Segmente unterschiedlicher Temperatur aufweisen, hat die Wärmestrahlung entscheidenden Einfluß, weil sie sich in alle Richtungen gleichmäßig verteilt und somit nicht direkt am Brand beteiligte Materialien thermisch belastet. Aus diesem Grunde wird der Ermittlung des Wärmestrahlungsaustauschs große Bedeutung beigemessen. Die bisher üblichen Wärmestrahlungsaustausch-Berechnungsverfahren zeigen bei einfachen Modellen ihre gute Anwendbarkeit. Bei dem Modell mehrschichtiger Segmente,

die sich zeitlich geometrisch verändern und sich gegenseitig wechselseitig beeinflussen, wird wegen der Möglichkeit der Anwendung von Groß-EDV-Anlagen ein statistisches Berechnungsverfahren verwendet. Es ist speziell für den Wärmestrahlungsaustausch in komplexen Geometrien entwickelt worden und wird allgemein als Monte-Carlo-Methode bezeichnet.

2.4.3.1 Allgemeine Voraussetzungen

Die Beschreibung des Wärmestrahlungsaustausches zwischen festen Materialien erfolgt nach Gesetzen, die für ideale schwarze Strahler gelten. Über ihre Anwendung kann mit vorgegebenen Vereinfachungen der Strahlungsaustausch für reale Flächen bestimmt werden.

Der Ausgangspunkt für die mathematische Formulierung ist das Plancksche Gesetz. Es beschreibt die spektrale Intensitätsverteilung der Strahlung für einen schwarzen Körper in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und der absoluten Temperatur T .

Bei Integration über den gesamten Wellenlängenbereich erhält man als Sonderfall das Stefan-Boltzmannsche Gesetz, das einen idealen schwarzen Strahler beschreibt, der pro Zeit und Flächeneinheit in den Halbraum den Energiestrom abstrahlt, wobei C_s der Strahlungskoeffizient des schwarzen Strahlers ist.

$$e_s(T) = C_s \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (35)$$

Damit reale Zustände erfaßt werden können, wird eine Größe eingeführt, die die Abweichung der Strahlungsenergie des grauen Strahlers im Verhältnis zum schwarzen Strahler beschreibt.

$$e(T) = \epsilon \cdot e_s(T) \quad (36)$$

ϵ heißt Emissionsgrad, wird aber auch Emissionszahl oder Emissionsverhältnis genannt. Ist ϵ unabhängig von λ , wird der Strahler als grauer Strahler bezeichnet.

Für den Strahlungswärmeaustausch muß nicht nur die emittierte Energie, sondern auch die absorbierte Energie einer Fläche bestimmbar sein, die die Grundlage zur Bestimmung der Absorptionszahl darstellt.

Der Zusammenhang zwischen Absorptionsgrad α und dem Emissionsgrad ϵ bei gleicher Temperatur wird durch das Kirchhoffsche Gesetz beschrieben, das streng genommen nur für monochromatische Strahlung gilt.

$$\alpha_{\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda}(T) \quad (37)$$

Allerdings kann es bei nicht zu starken Temperaturunterschieden zweier Körper oft vereinfachend verwendet werden. Bei grauen Strahlern ist der Absorptionsgrad unabhängig von der Wellenlänge λ , so daß

$$\alpha = \epsilon \quad (38)$$

gilt.

Die allgemeine Form der Gleichung (37) setzt bei ihrer Anwendung die Kenntnis des Absorptionsgrades als Funktion der Wellenlänge λ und der Temperatur voraus.

Neben Absorptions- und Emissionsgrad ist die Strahlungsintensität in Abhängigkeit vom Winkel β zwischen der Flächennormalen und der Strahlungsrichtung entscheidend und wird durch das Cosinus-Gesetz von Lambert beschrieben:

$$e_s = i_s \int \cos \beta \cdot d\omega = i_s \int \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma \quad (39)$$

Die Winkel β und γ legen die Strahlungsrichtung zwischen zwei Flächenelementen fest, wobei der Winkel γ die Richtung der Strahlenebene beschreibt (Bild 2).

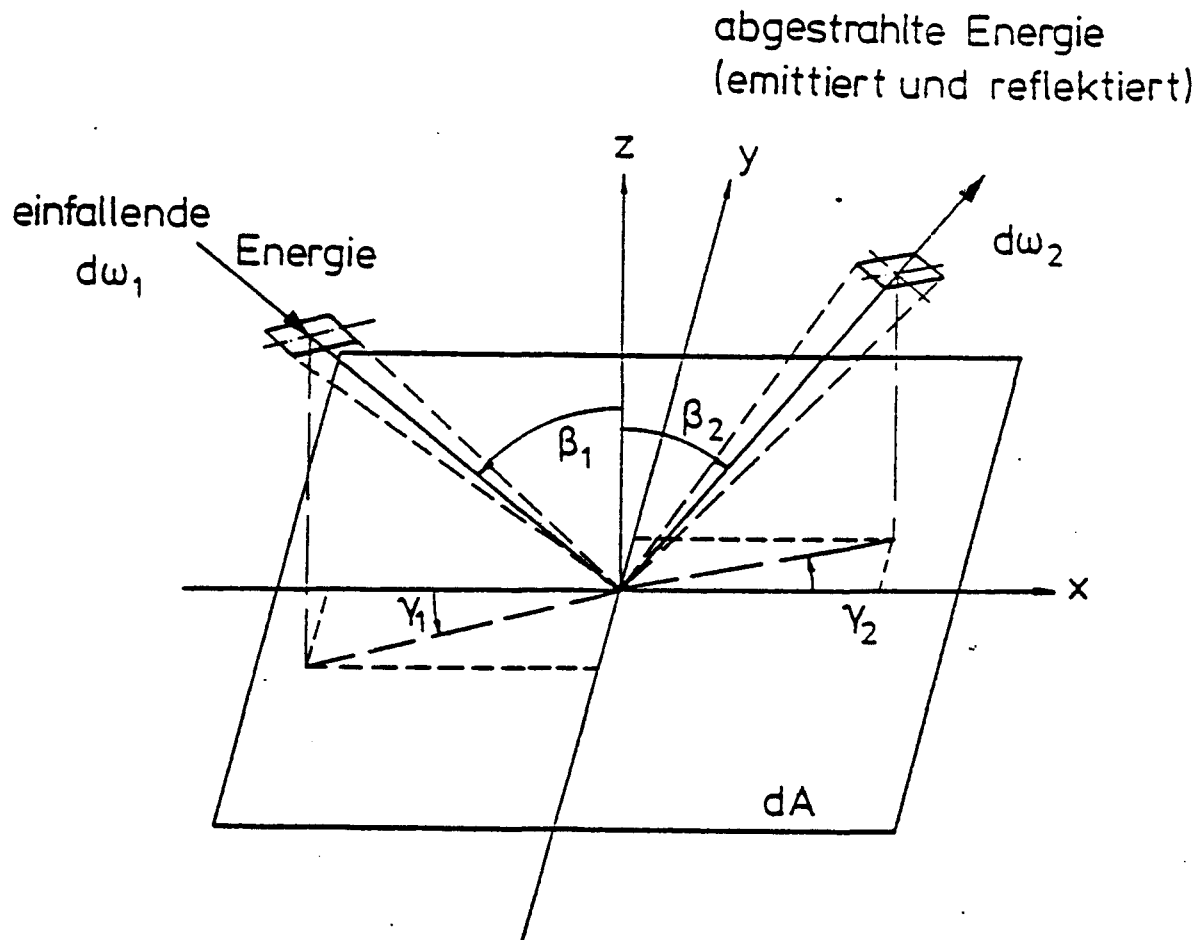


Bild 2: Geometrische Verhältnisse für einfallende und abgestrahlte Energie auf ebenen Flächen

Bei Verwendung des Cosinusetzes ist die Möglichkeit gegeben, die räumliche Abstrahlung von einer ebenen Fläche in ihre Umgebung zu beschreiben oder auch die Einstrahlung von verschiedenen Flächen auf eine Segmentoberfläche des Brandraums zu bestimmen.

Die Abstrahlung, die insgesamt eine schwarze Segmentoberfläche verläßt, ergibt sich aus der Integration von Gl. (39) über die gesamte Halbkugel zu

$$e_s = \pi \cdot i_s \quad (40)$$

und ist nach Gl. (40) das π -fache der Strahlungsintensität in Flächennormalenrichtung.

Der Energieaustausch zwischen zwei Flächen, ohne einen Einfluß über dritte Flächen zu berücksichtigen, ergibt sich mit Gl. (39) und dem quadratischen Abstandsgesetz (42)

$$d\omega = \frac{dA_2 \cos \beta_2}{r^2} \quad (41)$$

zu

$$dQ_{1-2} = i_s \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad (42)$$

Dabei wird ein reflektierter Anteil von dritten Flächen, der von A_1 über A_3 auf A_2 trifft, nicht berücksichtigt. Weiterhin werden die Gesetzmäßigkeiten, die durch die Gl. (39) und (42) beschrieben werden, von den in der Natur vorkommenden Stoffen nicht streng erfüllt. Für reale Flächen muß bei Anwendung des Cosinusgesetzes vorausgesetzt werden, daß das Emissionsverhältnis ϵ unabhängig von der Ausstrahlungsrichtung ist.

Gl. (41), erweitert mit der Dimension der Fläche A_1 , ergibt das in der Literatur bekannte Winkelverhältnis. Aufbauend auf den physikalischen Grundlagen für die Bestimmung des Winkelverhältnisses ist eine algebraische Methode für zwei Flächen entwickelt worden. Sie wird als Standard- oder Nettomethode [26] bezeichnet und berücksichtigt die emittierten, absorbierten und reflektierten Anteile der Energie, die von A_1 ausgesandt und zwischen beiden Flächen ausgetauscht wird.

Der Vorteil dieser Methode liegt in ihrer physikalischen Übersichtlichkeit für den Verbleib des einmal emittierten Strahlungsanteils einer Fläche. Wendet man jedoch das Verfahren auf die Anordnung des Brandraums an, wo durch die Segmentierung eine große Zahl von Teilflächen entstanden ist, so geht durch die Einbeziehung aller Reflexionsmöglichkeiten die Übersichtlichkeit verloren.

Bei komplexen Geometrien, die der Brandraum in einem Mehrzonenmodell mit seinen Umgebungswänden darstellt, reicht die Bestimmung von Winkelverhältnissen zwischen zwei Flächen nicht aus, weil der zusätzlich reflektierte Anteil der Energie berücksichtigt werden muß, der aus der Umgebung auf die zu untersuchende Fläche gestrahlt wird.

Mit den folgenden Wärmebilanzen kann das thermische Verhalten des Flächenelements dA_i beschrieben werden, wobei sich die geometrischen Verhältnisse aus Bild 2 ergeben.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Gesamtwärmestrom} \\ \text{durch Strahlung,} \\ \text{der die Fläche} \\ dA_i \text{ verläßt} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Emissionsvermögen} \\ \text{der Fläche } dA_i \text{ in} \\ \text{Richtung } \beta_2, \gamma_2 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{reflektierter Wärmestrom} \\ \text{der Fläche } dA_i \text{ in Richtung} \\ \beta_2, \gamma_2 \text{ einfallend von } dA_j \\ \text{mit } \beta_{2j}, \gamma_{2j} \end{array} \right] \quad (43)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Netto-Strahlungs-} \\ \text{wärme der Fläche} \\ dA_i \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Gesamtwärmestrahlung, die die} \\ \text{Fläche } dA_i \text{ in Richtung } \beta_2, \gamma_2 \\ \text{verläßt} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Wärme, die von den} \\ \text{Flächen } dA_j \text{ auf die Fläche} \\ dA_i \text{ gestrahlt wird} \end{array} \right] \quad (44)$$

Die Gleichungen (43) und (44) sind analytisch nur für einfache Geometrien zu lösen, weil ein System von Integralgleichungen entsteht, oder man verwendet Methoden, die mit Näherungslösungen arbeiten. Die das Problem beschreibenden Integralgleichungen vereinfachen sich durch Ansätze wie Segmentierung der Flächen und Annahmen über Oberflächenbeschaffenheit und Strahlungseigenschaften zu übersichtlichen Gleichungen, die für komplexe Geometrien verwendbar sind und in linearen algebraischen Gleichungssystemen ausgedrückt werden können.

Gl. (43) und (44) beschreiben den physikalischen Hintergrund der algebraischen Methode, die notwendig wird, um das Winkelverhältnis durch Absorptionsszahlen zu ersetzen. Ausgehend von der Voraussetzung, daß jede Segmentfläche Energie abgibt und ebenso Energie durch Strahlung aufnimmt, ergibt sich ein Netto-Wärmestrom nach Gl. (44).

Eine wichtige Größe zu seiner Ermittlung ist die Absorptionszahl φ_{ji} , die sich aus dem Verhältnis der von A_j an A_i abgegebenen und dort absorbierten Energie zur insgesamt abgegebenen Energie der Fläche A_j ergibt.

$$\varphi_{ji} = \frac{\text{Energie absorbiert von } A_i \text{ ausgesandt von Fläche } A_j}{\epsilon_j \cdot A_j \cdot C_s \left(\frac{T_j}{100} \right)^4} \quad (45)$$

Dabei setzt sich die absorbierte Energie der Fläche A_i aus folgenden Teilen zusammen:

1. der emittierten Energie E_{ji} der Flächen A_j und den Temperaturen T_j , die direkt von Fläche A_j auf A_i trifft, und
2. den Anteilen der Reflexion, die auch über weitere Flächen von A_j nach A_i gelangen kann.

Darüber hinaus ist anzumerken, daß die emittierte Energie der Fläche A_j aufgrund von Reflexionsprozessen von A_i an die Ausgangsfläche zurückgeworfen werden kann, dort absorbiert wird und anschließend als Emissionsenergie wieder an A_i abgegeben werden kann. Dieser Vorgang wird in Gl. (45) berücksichtigt.

Durch ein analytisches Modell kann der physikalische Einfluß von φ_{ji} verdeutlicht werden, in dem alle Temperaturen des umschlossenen Raums zu Null gesetzt werden und lediglich die Teilfläche A_j mit endlicher Temperatur strahlt. Die A_i erreichende Energie wird direkt und reflektiert eingestrahlt und stammt von einer Energiequelle der Fläche A_j . Bei Anwendung dieses Verfahrens auf alle Segmentflächen A_j und ebenso auf Fläche A_i läßt sich diese Netto-Strahlungswärme \dot{Q}_i der Fläche A_i für den Brandraum als Netto-Abstrahlung beschreiben.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_i &= e_i \cdot A_i - \varphi_{1i} \cdot e_1 \cdot A_1 - \varphi_{2i} \cdot e_2 \cdot A_2 - \dots - \varphi_{ni} \cdot e_n \cdot A_n \\ &= e_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^n \varphi_{ji} \cdot e_j \cdot A_j\end{aligned}\quad (46)$$

Das Gleichungssystem (46) gilt für jede Fläche A_i . Der Wert der Absorptionszahl φ_{jj} wird nicht Null, weil durch Reflexion von vielen Flächen in komplexen Gebilden ein relativ hoher Anteil auf die Strahlungsquelle zurückfällt.

Das daraus zur Berechnung der φ_{ji} entstehende lineare Gleichungssystem mit n Gleichungen für die n Segmentflächen ist lösbar. Die Grenzen dieses Verfahrens werden einmal durch die Genauigkeit der zu erzielenden Ergebnisse

festgelegt, wobei die Strahlungseigenschaften und die Temperatur in jedem Punkt einer Fläche gleich bleiben, und zum anderen durch den dazugehörigen Rechenaufwand für die Lösung der Gleichungen eines in kleine Flächen aufgeteilten Systems. Ein Vorteil des oben beschriebenen Verfahrens liegt in der Unabhängigkeit der Austauschzahlen φ_{ji} von den Temperaturen im System. Der Aufwand für die zu berechnenden Absorptionszahlen reduziert sich durch die folgenden Bedingungen:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_{ji} = 1 \quad (47)$$

und nach Gebhard [33]

$$\varphi_{ji} \cdot \epsilon_j \cdot A_j = \varphi_{ij} \cdot \epsilon_i \cdot A_i \quad (48)$$

Das bisher vorgestellte Berechnungsverfahren berücksichtigt bisher lediglich geometrisch angeordnete Flächen, die in ihrem Strahlungsverhalten nicht durch Gase beeinflusst werden, die sich zwischen ihnen aufhalten und zusätzlich Energie absorbieren oder emittieren.

Ein Energiebündel, auf dem Weg durch eine Gasschicht, wird längs des Weges einen Intensitätsverlust erleiden. Diese absorbierte Energie wird durch den Absorptionsgrad

$$\alpha = 1 - e^{-a \cdot \ell} \quad (49)$$

erfaßt. Energien, die durch Gl. (49) beeinflusst werden, können einmal von den Wänden, dem Feuer und dem Rauchgas selbst kommen. Wichtig für den Anteil der absorbierten Energie im Gas ist die Kenntnis über die Zusammensetzung des Gases selbst. Wenn die Anteile von Wasserdampf, Kohlendioxid und Ruß im Rauchgas bekannt sind, kann der Anteil der vom Rauchgas längs des Weges absorbierten und emittierten Energie im Rechenmodell berücksichtigt werden.

Die vollständige Erfassung des Strahlungswärmeaustauschs im Brandraum unter Berücksichtigung der Gasstrahlung wird mit dem System der algebraischen Methode zu aufwendig und unübersichtlich, da die Kenntnisse über die gegenseitigen physikalischen Beeinflussungen in der Gesamtlösung verloren gehen.

Die Monte-Carlo-Methode dagegen eröffnet die Möglichkeit, komplexe Systeme dieser Art - unter Einbeziehung der geometrischen Veränderung der Rauchgasschicht - in ihrem Strahlungsaustausch zu erfassen. Es ist ein auf statistischer Basis ablaufendes numerisches Berechnungsverfahren, dessen mathematische Herleitung und Anwendbarkeit in entsprechender Fachliteratur gezeigt wird [27, 28].

Das Ausgangsproblem für die Anwendung der Methode ist die Erstellung eines mathematisch-physikalischen Zusammenhanges eines wirklichen Zustandes. Bis hierher entspricht der gezeigte Vorgang dem Aufstellen algebraischer Methoden für Wärmestrahlungsaustauschvorgänge. Der weitere Schritt ist der, daß keine Gesamtlösung der mathematischen Formulierung angestrebt, sondern durch statistische Gesetzmäßigkeiten eine Art simulierte Stichprobe der Gesamtlösung gefunden wird. Dieses vorhandene Simulationsmodell wird stochastisch, d. h. mit Hilfe von Zufallszahlen untersucht, die eine gleichmäßige Wahrscheinlichkeitsverteilung zwischen Null und Eins haben. Durch die Menge der verwendeten Zufallszahlen können bei häufigem Durchrechnen des einfachen Modells statistisch gesicherte Ergebnisse erzielt werden. Daher ist die Anwendung dieser Methode nur über eine EDV-Rechenanlage möglich. Die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse hängt ab von der Anzahl der verwendeten Zufallszahlen, ebenso von der Güte des Zufallszahlengenerators der Rechenanlage, d. h. der Gleichverteilung der Zufallszahlen und des weiteren von den im Modell berücksichtigten physikalischen Ansätzen.

2.4.3.2 Grundlagen der Monte-Carlo-Methode

Im folgenden Kapitel soll die Anwendung der Monte-Carlo-Methode bei einem bestimmten Problem und vorgegebenen Randbedingungen gezeigt werden. Untersucht wird ein System mit n Flächen. Die Temperatur T sei konstant über der Segmentoberfläche, und das Emissionsverhältnis ϵ sei unabhängig von der Temperatur und der Wellenlänge λ . Die Strahlung der einzelnen Oberflächen erfolge nach dem Lambertschen Cosinusetz.

Ausgangspunkt für die Wärmestrahlungsausbreitung sei ein beliebiges Segment mit der Oberfläche A_j oder das Volumen V_j eines Gaspartikels. Als Auftreffpunkt für die abgestrahlte Energie kann sowohl jede Fläche A_i , die freie Umgebung als auch die Gasschicht in Frage kommen.

Nach Gl. (36) kann die von einem Segment auf die Fläche bezogene, ausgesandte Energie bestimmt werden. Diese Energie wird in N_j Teile oder Energiebündel zerlegt, so daß ein Teil den Energieinhalt S_j hat (Gl. 50).

$$S_j = \frac{E_j}{N_j} \quad (50)$$

Während des Berechnungsvorganges für die Erfassung der ausgesandten Energie von einer Segmentoberfläche A_j mit der Temperatur T sollen alle anderen Segmentflächen A_i die fiktive Temperatur $T = 0$ K haben, damit der Verbleib der einzelnen Energieanteile erfaßt werden kann. Dieses Verfahren gilt analog für alle anderen Segmente, wenn deren Abstrahlung bei der Temperatur T untersucht wird. Dadurch wird eine Superpositionierung der Strahlungseinflüsse erreicht, und weiterhin erhält man Ergebnisse über die Auswirkung auf die Gesamtstrahlungsenergie.

Der Verbleib des Energieanteils kann unterschiedlich sein. Einmal kann er längs des Weges in Gas total absorbiert werden, oder beim Auftreffen auf die Fläche A_i entscheidet es sich, ob der Energieanteil S_j absorbiert oder entsprechend der Oberflächenbeschaffenheit und Materialeigenschaft reflektiert wird. Der Reflexionspunkt stellt jetzt für das augenblicklich betrachtete Energiebündel den weiteren Ausgangspunkt dar, von dem erneut die Abstrahlung in den Brandraum erfolgt.

Die Richtung der wie Pfeile die Segmentoberfläche verlassenden Energieanteile kann durch die Bestimmung des Raumwinkels $d\omega$ (Bild 2) erfaßt werden. Dazu ist in sphärischen Koordinaten die Kenntnis der Winkel β und γ notwendig.

$$d^2\omega = \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma \quad (51)$$

Der Raumwinkel $d^2\omega$ (Gl. 51) entspricht der Wahrscheinlichkeitsfunktion, die, integriert über den möglichen Abstrahlungsbereich eines Energiebündels in den Halbraum, die Verteilungsfunktion des statistischen Vorganges aus rein geometrischer Sicht darstellt [28]. Unter Berücksichtigung der Richtungsverteilung für die abgestrahlte Energie nach dem Lambertschen Cosinusgesetz emittiert die Fläche A_j in Richtung A_i die Energie pro Flächen- und Zeiteinheit.

$$d^2Q_{ji} = a_j \cdot e_j \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \, d\beta \, d\gamma \quad (52)$$

Gl. (52) ist die Wahrscheinlichkeitsfunktion, die die geometrischen Verhältnisse und ebenso ein die Strahlung beschreibendes Gesetz berücksichtigt.

Durch Normierung der ausgesandten und durch Gl. (52) beschriebenen Energieanteile ergibt sich unter Berücksichtigung der in den Halbraum gesamt abgestrahlten Energie der Fläche A_j

$$\dot{Q}_{j,ges} = A_j \cdot e_j \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma \quad (53)$$

eine Zufallszahl R in Abhängigkeit der Winkel β und γ . Die Zufallszahl $R(\beta, \gamma)$

$$R(\beta, \gamma) = \frac{\int_0^\gamma \int_0^\beta \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma}{2\pi \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma} \quad (54)$$

kann lediglich Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

Die Winkel β und γ müssen in den Grenzen für die Halbkugel

$$0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \quad (55)$$

$$0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (56)$$

unabhängig voneinander durch Zufallszahlen erfaßt werden.

Die Zufallszahlen $R(\beta)$ und $R(\gamma)$ werden einzeln ermittelt durch jeweiliges Einsetzen der unteren und oberen Grenzen der anderen Veränderlichen. Die Lösung des Doppelintegrals mit den angegebenen Grenzen im Nenner der Gleichung (54) ergibt den Wert Π .

$$R(\beta)_\gamma = \frac{1}{\pi} \int_0^\gamma \int_0^{\pi/2} \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma \quad (57)$$

$$R(\gamma)_\beta = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\beta \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma \quad (58)$$

Die Ergebnisse für die Zufallszahlen R_β und R_γ aus den Gl. (57) und (58) werden zuerst durch Lösen der jeweils bestimmten Integrale und der darauffolgenden Integration nach der unbestimmten Veränderlichen gefunden [29].

$$R_\beta = \sin^2 \beta \quad (59)$$

$$R_\gamma = \frac{\gamma}{2\pi} \quad (60)$$

Mit den voneinander unabhängigen Zufallszahlen R_β und R_γ wird der statistische Einfluß auf die zufällige Wahl von β und γ verlagert.

Bisher wurde die Richtung der Energiebündel mit dem Energieinhalt S_j durch die Gl. (59) und (60) bestimmt. Der Weg, den das Energiebündel zurücklegt, bis es von einer Fläche A_i absorbiert wird, kann vielfältig sein. Einmal erhält A_i durch direkte Zustrahlung Energieanteile und andererseits durch Einfach- oder Mehrfachreflexion über im Brandraum vorhandene Segmente.

Die Zufallszahlen R_β und R_γ gelten allgemein unter Berücksichtigung des Cosinusgesetzes. Die geometrische Bedeutung liegt darin, daß jede Fläche A_j und jedes Gasvolumen V_j als Strahler gewählt werden und jedes vorhandene Segment einschließlich der Fläche A_j und Gasvolumen V_j Strahlung absorbieren kann.

Bei allgemeiner Gültigkeit des Kirchhoffschen Gesetzes (Gl. 38) kann der Zusammenhang zwischen Emissionsgrad ϵ und Reflexionsgrad ρ mit

$$\epsilon = 1 - \rho \quad (61)$$

beschrieben werden. Gl. (61) gilt allerdings nur für feste Oberflächen.

Durch Einführen einer zusätzlichen unabhängigen Zufallszahl zwischen 0 und 1 wird erfaßt, welche der N_j Energieanteile reflektiert werden. Diese Zufallszahl unterliegt den Voraussetzungen von Gl. (61). Sie und der Emissionsgrad können Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei nach Gl. (61) die Differenz ϵ durch den reflektierten Anteil - dargestellt durch ρ - erfaßt wird. Ob ein auftreffendes Energiebündel reflektiert wird, hängt davon ab, ob die gerade gültige Zufallszahl $R_{\text{refl.}}$ größer als der Wert des Emissionsgrades ϵ ist. In diesem Fall wird das Energiebündel reflektiert. Durch die Gleichverteilung der Zufallszahl zwischen 0 und 1 wird so der gesamt reflektierte Anteil nach Gl. (61) erfaßt. Nach [29] gilt:

$$R_{\text{refl.}} \geq \epsilon \quad (62)$$

Liegen bei den verwendeten Materialien Angaben über den Emissionsgrad ϵ in Abhängigkeit von der Temperatur T und Einstrahlungsrichtung β aufgrund von Messungen vor, so kann dieser Einfluß nach Gl. (62) berücksichtigt werden.

Die Vorgehensweise ist für die Gasstrahlung gleich, so daß die Gl. (52) bis (60) mit geringfügigen Änderungen verwendet werden können. Der Unterschied besteht darin, daß ein Gaspartikel in den gesamten Raum Strahlung abgeben kann, eine ebene Fläche lediglich in den darüber liegenden Halbraum (Bild 2). Dadurch erweitert sich bei der Gasstrahlung der Anwendungsbereich des Winkels β um 90° auf

$$0 \leq \beta \leq \pi \quad (63)$$

Gl. (56) behält weiter ihre Gültigkeit.

Die Berechnung der Zufallszahl R_β für die Gasschicht erfolgt analog nach Gl. (57) und ergibt:

$$R_\beta = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (64)$$

Für die Zufallszahl R_γ des Ebenenwinkels γ , um die Abstrahlrichtung eines Gasvolumens zu erfassen, gilt Gl. (60) ebenso.

2.4.3.3 Anwendung auf Brandräume

Zur Anwendung der Monte-Carlo-Methode auf Brandräume muß folgendes definiert werden:

1. Abmaße des Gesamtbrandraumes,
2. Anordnung der Boden-, Seiten- und Deckflächen zueinander durch mathematische Beschreibung und deren Bezeichnung,
3. Ort des Brandes auf der Grundfläche,
4. Emissionsverhältnis der Wandoberflächen,
5. Gaszusammensetzung hinsichtlich Wasserdampf, Kohlendioxid und Ruß,
6. Anzahl der Energieanteile, die pro Fläche oder Volumenelement die gespeicherte Energie darstellen.

Als variable Größe ist allein die Höhe der Gasschicht anzusehen. Sie hat Auswirkungen auf die Größe der Seitenflächen unter und hinter der Gasschicht. Ebenso wird die Höhe des Feuerplumes verändert, der bis zur Heißgasschicht reicht.

Als Voraussetzung gilt:

1. das Emissionsverhältnis ist konstant für eine Segmentoberfläche,
2. das Emissionsverhältnis der Gase sei konstant im gesamten Segment
- das Volumen ist aber temperaturabhängig,
3. in einem Brandraumsegment gibt es keine Temperaturunterschiede

Der Brandraum wird hinsichtlich der Strahlung eingeteilt in Segmente, die

- a) Energie abgeben (Strahler) und
- b) Energie aufnehmen (Empfänger).

Als Strahler sind die Boden- und Deckflächen mit ihren dazugehörigen Seitenflächen anzusehen, ebenso der Feuerplume als senkrechte Säule und die Gasschicht mit ihrem gesamten Volumen.

Als Empfänger sind die Segmente von Boden, Decke und Gasschicht anzusehen. Der Feuerplume absorbiert keine Wärmestrahlung, da einmal das Verhältnis der Flächen zwischen Plume und Brandraum sehr gering ist und auf der anderen Seite die thermodynamischen Zahlenangaben über den Brand so streuen, daß eine Erwärmung durch Wand- oder Gaseinstrahlung vernachlässigbar ist.

Im folgenden sollen kurz die Einflüsse dargestellt werden, denen ein Energieteil unterliegt, bis es irgendwo im Brandraum absorbiert wird.

Segment II (Plume): Der Plume sei eine Säule, von deren Achse soll die gesamte Energie ausgesendet werden. Die vom Plume ausgesandte Gesamtenergie wird in N_j -Teile unterteilt, so daß nach Gl. (50) der Energieinhalt eines Teilchens bekannt ist. Nach Gl. (60) und (64) ist die Richtung des Strahlungsvektors definiert, wenn die Hauptrichtung der Strahlung senkrecht zur Plumeachse steht. Der Weg, den ein Energieteil zurücklegt, ist vielfältig, wenn nach Gl. (61) die Reflexion berücksichtigt wird. Das Energieteil trifft

1. auf eine Wand und wird absorbiert,
2. auf eine Wand und wird teilweise absorbiert und reflektiert. Der Reflexionspunkt ist der neue Abstrahlungspunkt des Teilchens mit seiner verbleibenden Restenergie und einer neu ermittelten Richtung (diffuse Strahlung),
3. auf die Gasschicht und wird auf seinem Weg absorbiert,
4. auf die Gasschicht und wird zum Teil absorbiert, trifft auf eine Wand, wird dort entweder ganz oder teilweise absorbiert und gelangt nach Reflexion erneut durch die Gasschicht und evtl. von dort auf weitere Flächen.

Dieser Vielfalt der Möglichkeiten wird ein Energieteil so lange unterworfen, bis seine Restenergie einen Grenzwert unterschreitet. Es existiert danach nicht mehr, und ein neues Teil wird im Plume auf den Weg geschickt. Bei jedem Wechsel der Richtung eines Teilchens muß die Richtung durch Zufallszahlen neu ermittelt werden.

Segment III (Gasschicht): Das Gasschichtvolumen in seiner dreidimensionalen Ausdehnung kann von jedem Punkt aus Energie abstrahlen. Deswegen ist der Ort der Energieabgabe für die x-, y- und z-Richtung ebenfalls durch Zufallszahlen zu bestimmen.

Es gilt:

$$x = R_x \cdot L \quad (65)$$

$$y = R_y \cdot B \quad (66)$$

$$z = R_z \cdot H_g \quad (67)$$

Für die Strahlung in Gasen gibt es keine Hauptstrahlungsrichtung, so daß mit Hilfe der Gl. (65) bis (67) und der Gl. (64) und (60) eine ungerichtete Strahlung aus dem Gas erreicht wird. Jedes ausgesandte Teil wird zuerst einen Weg durch das Gas selbst zurücklegen und dort teilweise absorbiert. Man erkennt sofort, daß die Dicke der Gasschicht ein Maß für die absorbierte Energie ist. Ansonsten unterliegt ein Energieteil ebenso den Bedingungen, wie sie für das Segment II erklärt worden sind.

Segment V (Decke): Das Deckensegment besteht aus fünf Flächen: der Decke selbst und den vier Wandflächen hinter der Heißgasschicht. Für jede dieser Flächen werden je zwei Bedingungen der Gl. (65) bis (67) zur Bestimmung des Standortes eines Energieteilchens notwendig. Die Richtung wird über die Gl. (59) und (60) ermittelt, da die Strahlung nach dem Cosinusetz (Gl. 39) in den Halbraum abgegeben wird. Jedes ausgesandte Teilchen wird zuerst seinen Weg durch die Gasschicht zurücklegen und unterliegt danach derselben Vielfalt von Möglichkeiten, die oben aufgeführt sind.

Segment VI (Boden): Für das Bodensegment gelten analog zu Segment V die gleichen Bedingungen. Der einzige Unterschied liegt darin, daß von der Wand abgesandte Teilchen zuerst durch den nicht absorbierenden Raum der unteren Luftschicht gehen.

Nachdem alle Energieteile aller Strahler untersucht und ihr Verbleib registriert worden ist, erhält man die notwendigen Absorptionszahlen nach Gl. (45). Mit den gewonnenen 12 Absorptionszahlen können die Terme der Gl. (15), (22) und (23), die durch die Strahlung hervorgerufen werden, bestimmt werden, wenn die Temperatur bekannt ist. Durch diese Vorgehensweise läßt sich eine beliebig feine Segmentierung des Brandraums erreichen.

Für die Ermittlung der Absorptionszahlen ist in der Programmsprache Fortran IV ein Programm entwickelt worden. Der Programmablaufplan (Bild 3) verdeutlicht, welche Eingabedaten notwendig sind. Der Plan stellt nur ein vereinfachtes Schema der Berechnung dar.

2.4.3.4 Absorptionszahlen

Mit der in Kap. 2.4.3 dargestellten Berechnungsmethodik werden im folgenden Ergebnisse für Absorptionszahlen gezeigt, die für die Erfassung des Wärmestrahlungsaustauschs in Brandräumen notwendig sind. Die Ergebnisse beziehen sich auf den Brandraum der Abmessungen 5 m x 4 m x 2,8 m, weil in dieser Raumgröße beim MPA Dortmund die Versuche durchgeführt wurden, die dieser theoretischen Betrachtung zugrunde liegen.

Entsprechend Kap. 2.4.3.3 werden 12 Absorptionszahlen berechnet, da 4 strahlende und 3 absorbierende Segmente angenommen werden. Sie sind in den Bildern 4 bis 7 dargestellt.

In Abhängigkeit von der Heißgasschichthöhe H_g verändern sich die Absorptionszahlen. In Bild 4 ist der Plume (Segment II) als Strahler dargestellt. Die drei Linienzüge für die Absorptionszahlen hängen - bezogen auf einen Strahler - voneinander ab, da zu jeder Gasschichthöhe die Summe der $\varphi_{i,j}$ gleich 1 ist. Somit läßt sich, unabhängig von der wirklich abgegebenen Energie, der prozentuale Verbleib ermitteln, da lediglich geometrische Parameter von Einfluß sind.

Aus der Darstellung wird deutlich - und das gilt für alle Brandraummodellgrößen -, daß bei wachsender Gasschichthöhe der Anteil der in der Gasschicht gespeicherten Energie immer größer wird. Zusätzlich ist von Einfluß, wie stark die Absorptionsfähigkeit des Rauchgases aufgrund seiner Zusammensetzung ist.

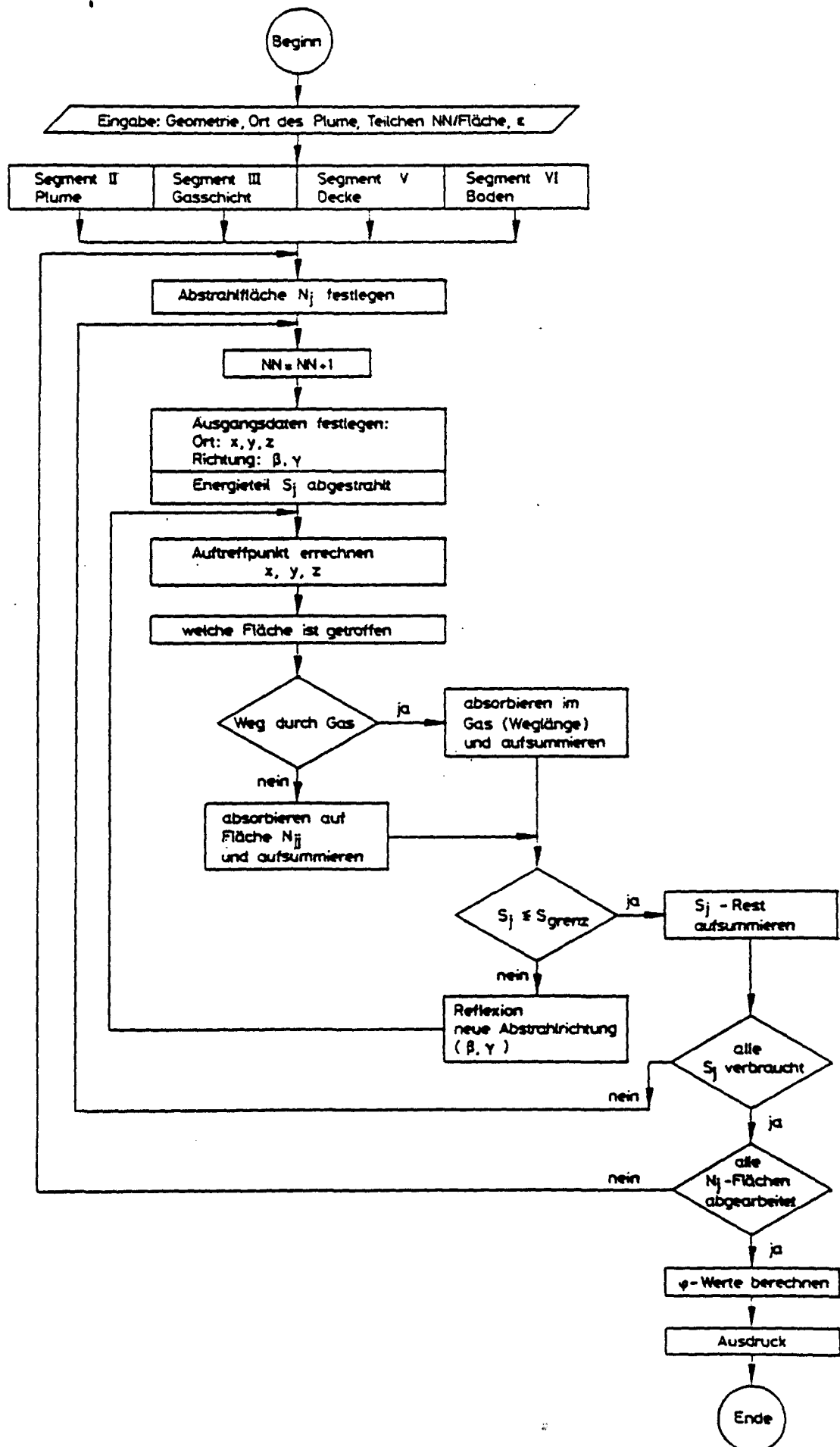
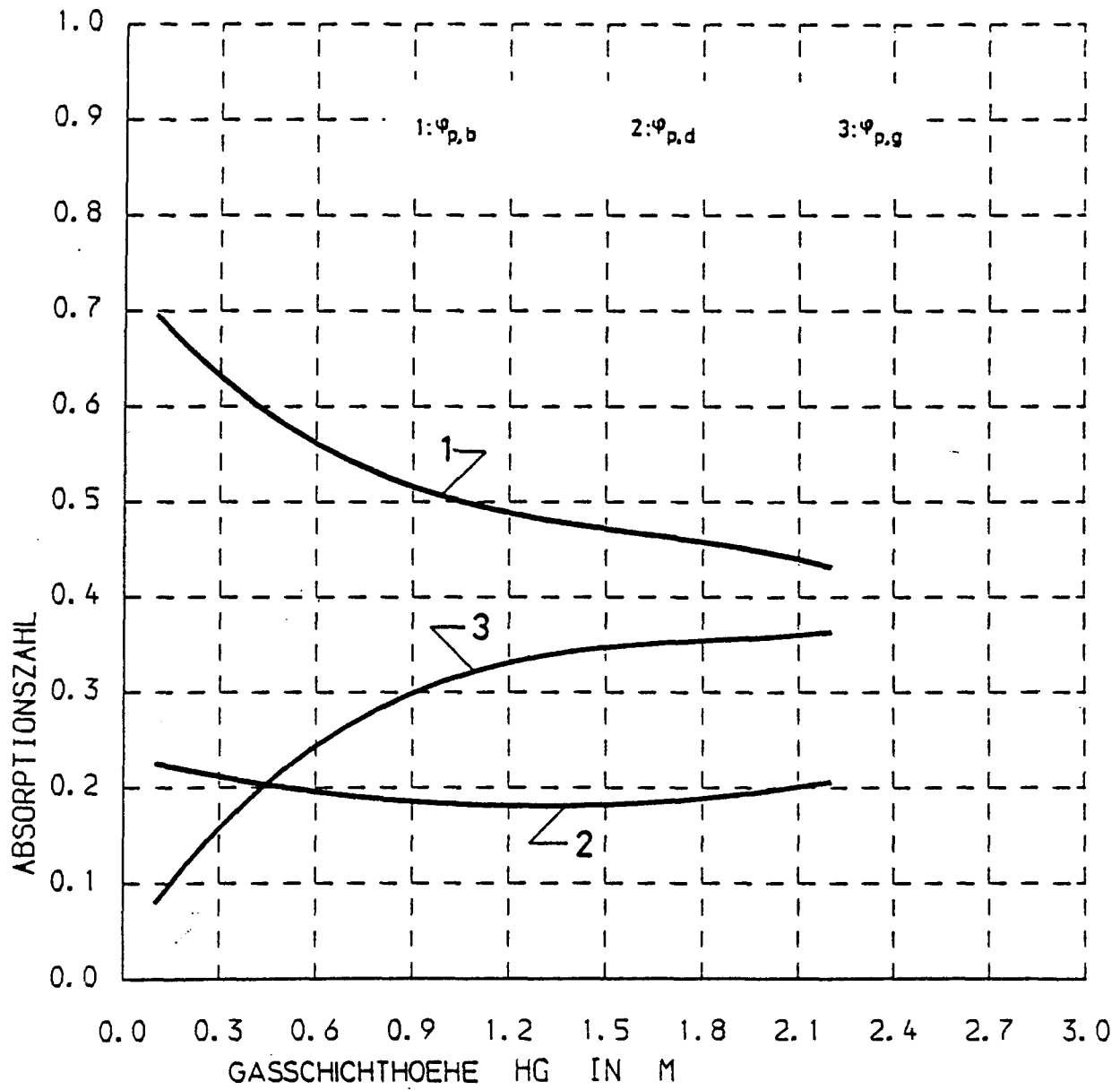
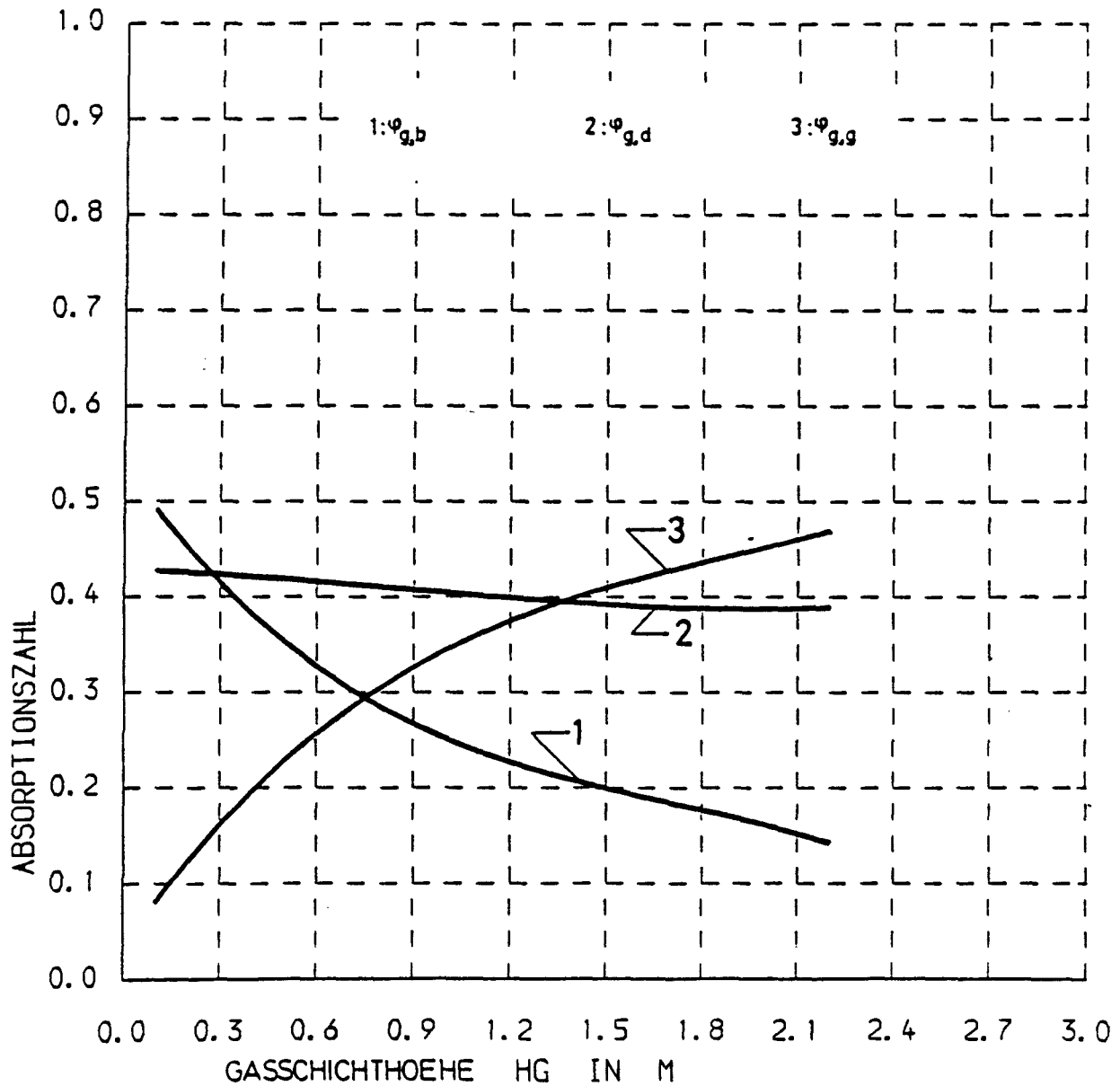


Bild 3: Programmablaufplan
Ermittlung von Absorptionszahlen nach der Monte-Carlo-Methode



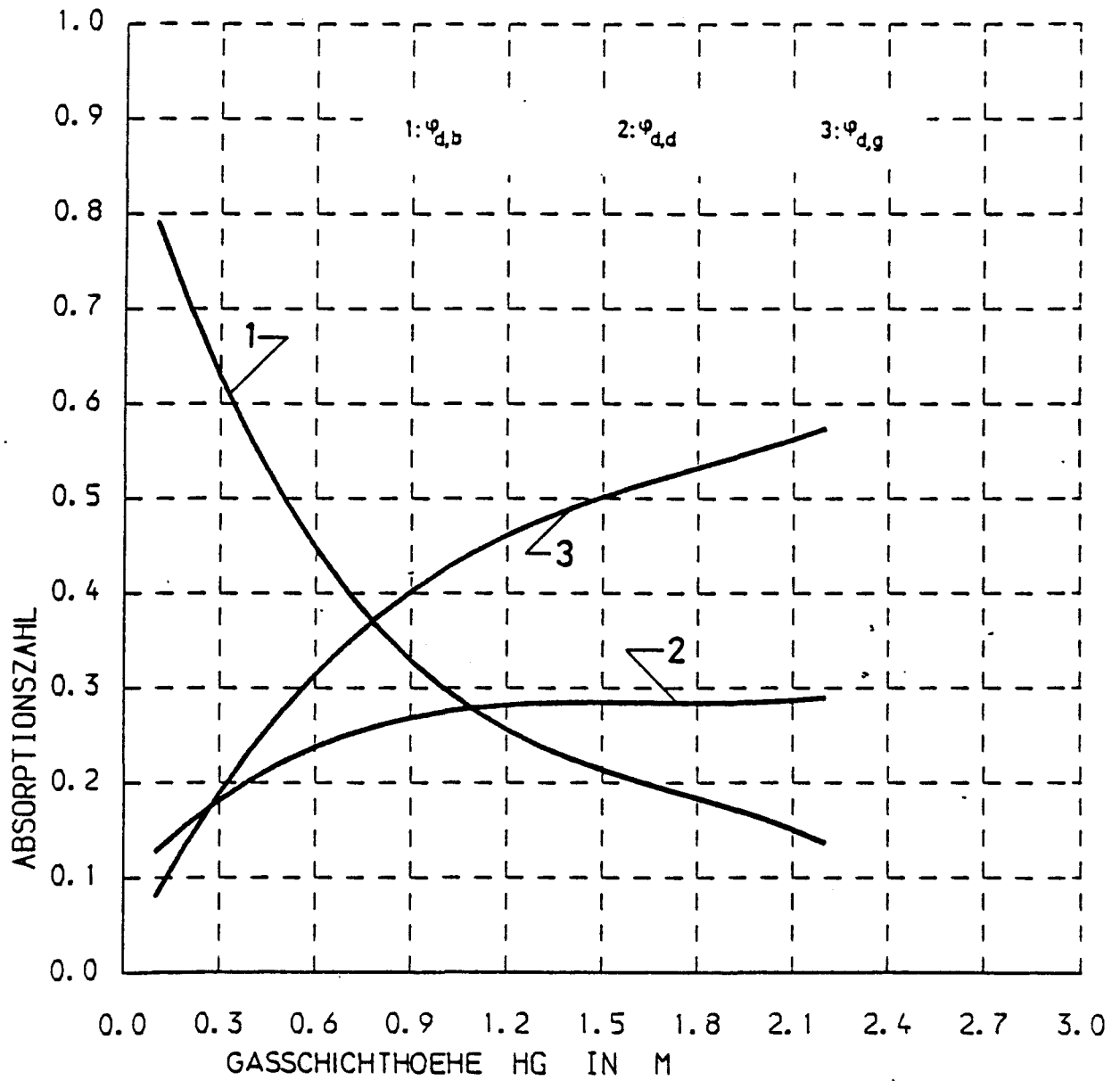
RAUMGEOMETRIE IN M (L=5.0, B=4.0, H=2.8)

Bild 4: Absorptionszahlen in Abhängigkeit von der Gasschichthöhe bei emittierender Plumeoberfläche
Plume p, Boden b, Decke d, Gasschicht g



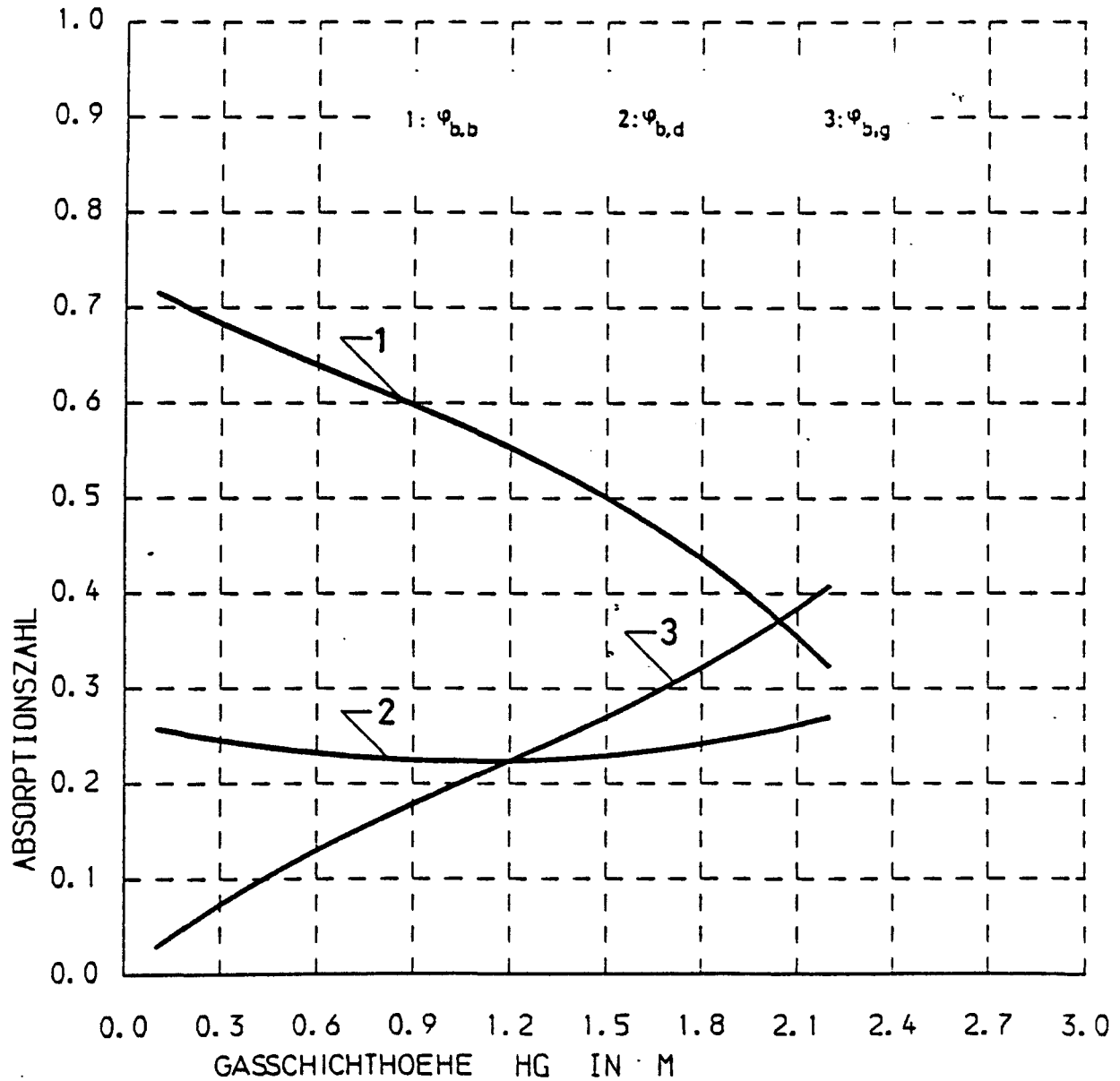
RAUMGEOMETRIE IN M (L=5.0, B=4.0, H=2.8)

Bild 5: Absorptionszahlen in Abhängigkeit von der Gasschichthöhe bei emittierender Gasschicht
Gasschicht g, Boden b, Decke d



RAUMGEOMETRIE IN M (L=5.0, B=4.0, H=2.8)

Bild 6: Absorptionszahlen in Abhängigkeit von der Gasschichthöhe bei emittierender Deckenfläche
Decke d, Boden b, Gasschicht g



RAUMGEOMETRIE IN M (L=5.0, B=4.0, H=2.8)

Bild 7: Absorptionszahlen in Abhängigkeit von der Gasschichthöhe bei emittierender Bodenfläche
Decke d, Gasschicht g, Boden b

Die in den Bildern 4 - 7 dargestellten φ -Werte sind für den Bereich angegeben, in dem die Gasschichthöhen H_g während der Versuche auftreten.

Zusätzliche Untersuchungen des Strahlungsaustausches an unterschiedlichen Geometrien haben gezeigt, daß die Größen für die φ -Werte völlig andere Werte annehmen können. Der Grund liegt in der Ausdehnung der Gasschicht [30], die einen großen Teil abgestrahlter Energie absorbieren kann. Aus diesen Ergebnissen heraus läßt sich sagen, daß eine direkte Übertragung der Ergebnisse, theoretisch wie experimentell, vom kleinen Brandraum auf den großen nicht möglich ist, da u. a. die Geometrieeinflüsse besonders im Wärmestrahlungsaustausch eine entscheidende Rolle spielen.

2.4.3.5 Strahlungsaustausch im Gesamtbrandraum

Zur vollständigen Erfassung der durch Strahlung ausgetauschten Energie im Brandraum fehlen Angaben über die Gasstrahlung. Je genauer die Zusammensetzung und der Zustand der Rauchgasschicht erfaßt werden, desto genauer wird eine Beschreibung des Gesamtbrandraums erfolgen.

Während eines Brandes wird sich die Zusammensetzung des Rauchgases ständig ändern. Das hängt von mehreren Einflußparametern ab, die sich teilweise überlagern und somit nicht exakt erfaßbar sind. Als wichtigste Größen sind hier die Art der Verbrennung, die Ventilationsmöglichkeiten, die Art und Anordnung des Brandmaterials sowie die Raumhöhe anzusehen. Aber gerade über die Strahlung, also das Emissions- und Absorptionsverhalten in Rauchgasen, streuen die Angaben in der Literatur stark. Da die Rauchgaszusammensetzung hinsichtlich der strahlenden Anteile wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Ruß schwankt, wird für die Darstellung der Ergebnisse ein Zustand vorgegeben. Wenn aber entsprechende Messungen vorliegen, können sie jederzeit im Rechenmodell berücksichtigt werden.

Ausgangspunkt für die Beschreibung des Emissions- und Absorptionsverhaltens von Gasen ist das Beersche Gesetz, das den Energieverlust von einfallender Strahlung längs seines Weges im Gas erfaßt (Gl. 49). Von Einfluß sind einmal die Weglänge im Gas sowie die Anteile strahlender oder absorbierender, mehr-

atomiger Gasmoleküle und die Temperatur der Gase selbst. Ab bestimmten Temperaturen kann für die Konzentration von strahlenden Bestandteilen deren Partialdruck verwendet werden. Das setzt voraus, daß die Einwirkungen der Moleküle eines strahlenden Gases untereinander und auf die eines Fremdgases nicht von der Konzentration abhängen.

Für diesen Fall hat Schack [31] Gleichungen angegeben, die Kurvenverläufe für Emissionsdiagramme von CO_2 - und H_2O -Dampf wiedergeben. Als einzige Vorgabe wird der Absorptionskoeffizient a [m^{-1}] benötigt, der durch Messungen über Rauchgaskonzentrationen erfaßt wird, in denen Ruß und andere Gasbestandteile berücksichtigt werden. Nach Durchsicht der Literatur wird ein Wert von $a = 0,4 \text{ m}^{-1}$ verwendet. Für parallele Platten mit einer dazwischen liegenden Gasschicht ist in [21] eine Verteilung der optischen Dichte τ oder Durchlässigkeit angegeben worden, um die notwendige Größe der gleichwertigen Schichtdicke S_{gl} zu erhalten. In Abhängigkeit von der Gasschichthöhe H_g wird diese Verteilung durch ein Polynom angepaßt und gilt für Gasschichthöhen bis zu 10 m [32]:

$$S_{gl} = 2 \cdot H_g \cdot e^{-0,2744 \cdot H_g \cdot a} \quad (68)$$

Mit Hilfe von Gl. (68) wird in Abhängigkeit von der Gasschichthöhe H_g und der Gasschichttemperatur T_g der Emissionsgrad ϵ_g des Gases ermittelt. Diese Berechnung wird in dem Unterprogramm EPGAS des Gesamtprogramms zur Brandraum-bilanzierung durchgeführt. Die Werte von ϵ_g liegen zwischen 0,2 und 0,4, wobei Rauchgasbestandteile von je 11 % für CO_2 - und H_2O -Dampf angenommen wurden.

Für die Emissivität der festen Wandoberflächen wird mit guter Näherung für Schamotte

$$\epsilon = 0,8 \quad (69)$$

verwendet. Bei Kenntnis von Temperaturabhängigkeiten in Gl. (69) sind diese ohne großen Aufwand in der Berechnung zu berücksichtigen. Sie sind allerdings in den Temperaturbereichen $T_w < 1000^\circ\text{C}$ nicht sehr groß.

Für die Darstellung der Strahlungsenergie im Brandraum sind die Gl. (15), (16), (22) und (23) zu erfüllen. Aufgrund des Brandraummodells ergibt sich, daß ebene Wände und Gasvolumina strahlen können. Deswegen sind unterschied-

liche Abhängigkeiten möglich. Für die Energieabgabe einer Wandfläche w gilt:

$$\dot{Q}_{s,w,ab} = A_w \cdot \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4 \quad (70)$$

Gl. (70) beschreibt die Gesamtenergie, die diese Wand in den freien Raum mit $T = 0 \text{ K}$ abgeben wird. Analog dazu hat ein Gasvolumen g den Energieinhalt [32]

$$\dot{Q}_{s,g,ab} = 4 \cdot \varepsilon_g (H_g, T_g) \cdot B \cdot L \cdot \sigma \cdot T_g^4 \quad (71)$$

Der Faktor 4 ergibt sich, wenn für ein Volumenelement nach Gl. (51) über den Gesamtraum integriert wird. Es bleibt lediglich die Grundfläche ($B \cdot L$) als geometrische Größe, die Höhe der Gasschicht geht nach Gl. (68) in ε_g ein.

Die Energien, die durch die Gl. (70) und (71) dargestellt werden, sind Gesamtenergieinhalte der Brandraumsegmente. Der Verbleib dieser Energien im Brandraum wird einmal durch die geometrische Anordnung der Segmente zueinander sowie andererseits durch die physikalischen Eigenschaften der Brandraumsegmente hinsichtlich Reflexion, Absorption und Emission bestimmt. Diese Verteilung der Energien durch Strahlung wird durch das Verfahren nach Kap. 2.4.3 mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode erfaßt.

Analog zu Gl. (70) und (71) werden unter Verwendung der Absorptionszahlen $\varphi_{i,j}$ die auf den Flächen und die im Gas selbst absorbierten Anteile folgendermaßen dargestellt:

$$\dot{Q}_{s,w-j} = \varphi_{w-j} \cdot A_w \cdot \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4 \quad (72)$$

und

$$\dot{Q}_{s,g-j} = 4 \varphi_{g-j} \cdot \varepsilon_g (H_g, T_g) \cdot B \cdot L \cdot \sigma \cdot T_g^4 \quad (73)$$

Der Index w symbolisiert ein Wandsegment. Der Index j erfaßt alle Segmente, die Energie absorbieren können, auch die Gasschicht. In Gl. (73) stellt der Index g die Gasschicht als Strahler dar. Die zur Berechnung notwendigen Absorptionszahlen sind in dem Kap. 2.4.3.4 für den Brandraum der Größe $5 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2,8 \text{ m}$ angegeben worden.

2.5 Zusammenfassung (theoretischer Teil)

Aufgrund der theoretischen Grundlagen in Kap. 2 ist ein Rechenmodell zur Bestimmung von Brandeinflußgrößen in variablen Brandräumen erarbeitet worden. Dazu sind zwei Rechenprogramme in Fortran IV geschrieben worden, mit denen einmal die notwendigen Absorptionszahlen zur Wärmestrahlungsausbreitung ermittelt und weiterhin unter Verwendung dieser Absorptionszahlen das Brandgeschehen simuliert werden kann.

Der Brandraum ist nach Bild 1 in sechs Segmente unterteilt, für diese und den Gesamtbrandraum müssen Energie- und Massenbilanzen erfüllt sein. Unter Verwendung der in Kap. 2 erklärten Ansätze werden in der folgenden Reihenfolge die Segmente untersucht und ihre sie beschreibende Größen wie Temperatur und Massenströme iterativ erfaßt, wobei gewonnene Ausgangsgrößen an den Segmentgrenzen die neuen Randbedingungen für die folgenden zu berechnenden Segmente sind:

1. Energiefreisetzung,
2. Ausbrand und Massentransport von Rauchgasen im Plume,
3. Vermischen der Heißgasschicht mit neuen Rauchgasen, Energie und Massenverlusten an die Umgebung,
4. Energie- und Massenbilanz der unteren Luftschicht unter Berücksichtigung einer Gesamtmassenbilanz,
5. Energiebilanz der Wände hinter der Gasschicht,
6. Energiebilanz der Fläche hinter der Gasschicht,
6. Energiebilanz der Fläche hinter der kälteren Luftschicht.

Als Eingabegrößen werden die geometrischen Abmessungen des Brandraums, die Größe der Dachöffnungen in der Decke sowie die Öffnungen in den Seitenwänden benötigt. Für die Energiefreisetzung wird entweder eine Abbrandfunktion vorgegeben, wie sie aus den vorliegenden Messungen gewonnen wurde, oder es wird ein Modell verwendet, das bei vorgegebenem Verlauf der Abbrandfunktion zu Beginn des Brandes in Abhängigkeit von vorgegebenen Entrainmentkoeffizienten und der Anordnung der Ventilationsöffnungen den gesamten Brandverlauf steuert.

Die Stoffwerte wie die Gasdichte ρ_g und die spezifische Wärmekapazität c_p werden temperaturabhängig berücksichtigt. Da der Brandverlauf und die ihn beschreibenden Gleichungen zeitabhängig sind, wird mit Zeitschritten Δt ge-

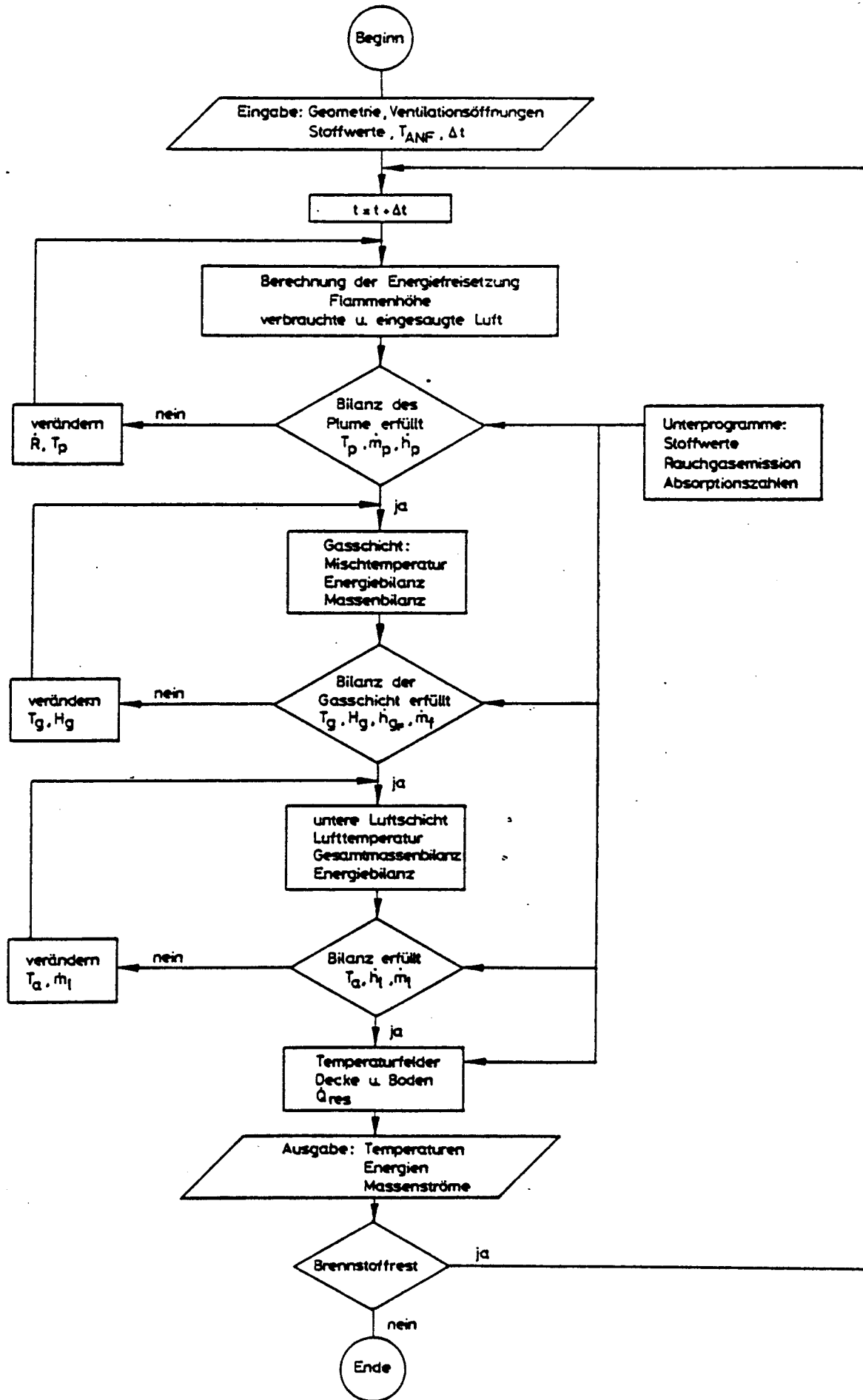


Bild 8: Programmablaufplan: Brandraummodell

rechnet, die zwischen 0,5 und 10 s liegen und entsprechend der Brandsituation angepaßt sind, d. h., daß die Zeitschrittweite entsprechend der Abbrandrate und der Raumgröße gewählt werden müssen, um nicht zu große Massenänderungen zu erhalten, die zu Instabilitäten im Rechenablauf führen würden.

Die Brandraumsegmente beschreibenden Größen wie die Temperaturen werden - sofern erforderlich - durch iterative Lösungsverfahren bestimmt. So sind für alle Orte und Zeitschritte die Temperaturen und somit ebenso Massen- und Energieströme erfaßbar. In Bild 8 ist ein vereinfachtes Schema eines Fließbildes des Rechenprogramms dargestellt, mit dem das Brandgeschehen für Brandräume mit horizontaler Gasschichtung erfaßt werden kann.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Allgemeines

Der Schwerpunkt dieses Berichtes liegt auf der theoretisch-rechnerischen Begleitung von Versuchen, die beim Materialprüfamt des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurden. Deswegen wird in diesem Bericht nicht mit großer Ausführlichkeit auf die Art und Durchführung der Versuche eingegangen und auf den zur gleichen Zeit entstehenden Versuchsabschlußbericht des Materialprüfamtes NRW zu diesem Forschungsvorhaben hingewiesen.

An dieser Stelle werden kurz der Versuchsaufbau und die Art der durchgeführten Versuche beschrieben. Weiterhin wird auf die erzielten Meßergebnisse eingegangen, die zum Vergleich Rechnung - Messung notwendig sind.

3.2 Aufbau der Versuchsanordnung

Die Brandversuche wurden im "kleinen Brandhaus" der Versuchsanlage für natürliche Brände beim Materialprüfamt NRW durchgeführt. Die Abmessungen des Brandraums sind 5,0 m x 4,0 m x 2,8 m. In der Decke des Brandraums waren Öffnungen als Rauch- und Wärmeabzüge angebracht, die variabel in ihrer Größe waren. Bei den Hauptversuchen wurde mit vier gleichmäßig über die Dachfläche verteilten Dachentlüftungsöffnungen gearbeitet.

In der Seitenwand wurden die Zuluftöffnungen installiert, wobei verschiedene Ausführungen verwendet wurden.

1. Der Hauptteil der Versuche wurde mit Zuluftkanälen durchgeführt, die sich im Brandraum gegenüberlagern und fast in der Ebene des Brandraumbodens angeordnet waren. Jede Zuluftöffnung hatte einen Querschnitt von $0,4 \text{ m}^2$. Durch diese Anordnung sollte eine praxisnähere Luftzufuhr an den Brandherd simuliert werden.
2. Bei Vorversuchen wurde eine Tür der Abmessungen $0,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ verwendet, wobei während der Brandentwicklung ebenso Rauchgase aus der Seitenöffnung heraustraten. Diese Variante wurde nach zwei Vorversuchen nicht weiter verwendet.
3. Die Seitenöffnungen waren wie unter Pkt. 1 lediglich mit dem Unterschied angeordnet, daß die Zuluftkanäle entfernt wurden, da hier der Ort der Brandlast im Brandraum und der Zündort bei verteilter Brandlast variiert wurden.

Die Seitenwände des Brandraums bestehen aus Hartschamotte-Steinen. Die konstruktiv vorhandenen Wanddurchbrüche wurden während der Versuche mit Gasbeton-Steinen zugesetzt.

Während aller Versuche wurden folgende physikalische Größen erfaßt:

- Der Gewichtsverlust des Brandgutes während des Versuchs mittels einer Abbrandwaage, die die gesamte Brandraumbodenfläche ausfüllte. Über diese Messungen kann die Abbrandrate \dot{R} ermittelt werden.
- Die Temperaturverteilung im Brandraum in vertikaler und horizontaler Richtung, ebenso an den Gasaustrittsöffnungen und den Lufteintrittsöffnungen;
- Die Geschwindigkeitsverteilungen an Zu- und Abluftöffnungen.
- Die Druckverteilung im Brandraum sowie die Bestimmung der neutralen Ebene im Brandraum ($\Delta p = 0$).
- die Rauchgasschichthöhe im Brandraum;

- die Analyse der Abgabe nach O_2 - und CO_2 -Bestandteilen;
- die Wärmeströme in die Seitenwände: Ermittelt werden diese durch Vergleichsbauteile, wobei ortsabhängig die Temperaturverteilung durch Thermoelemente ermittelt wird.

Mit Hilfe dieser Meßgrößen werden die Energie- und Massenströme während des Brandes ermittelt und können mit Rechenwerten verglichen werden.

3.3 Art der durchgeführten Versuche

Es wurden achtunddreißig Versuche durchgeführt, die in verschiedene Versuchsreihen eingeteilt wurden. In den einzelnen Versuchsreihen wurden folgende Gesichtspunkte untersucht:

- a) 2 Vorversuche - zum Testen der Meßanordnung und Meßsysteme,
- b) 6 Versuche - zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit von Versuchen mit und ohne Windeinfluß,
- c) 6 Versuche - zur Variation der Dachentlüftungsfläche,
- d) 4 Versuche - zur Variation der Brandlastfläche bei gleicher Brandlastmenge,
- e) 6 Versuche - zur Variation der Brandmenge,
- f) 4 Versuche - zur Variation der Brandlastart,
- g) 6 Versuche - zur Variation der Lage der Brandlast im Brandraum in Relation zur Lage der Dachentlüftungsöffnungen,
- h) 4 Versuche - zur Variation des Zündortes bei flächenhaft angeordneter Brandlast.

Für jede der durchgeführten Versuchsvariationen wurden mindestens zwei gleiche Versuche durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Als Brandmaterial wurde Fichtenholz in Krippenform verwendet. Lediglich in der Versuchsreihe f) wurden Heizöl EL und PP-Formteile verwendet. Wegen der Kosten der einzelnen Versuche konnten maximal bis zu drei Variationen bei der Änderung eines Parameters berücksichtigt werden. Die meisten Versuche erreichten keine flash-over-Bedingungen im Brandraum mit Ausnahme der Versuche der Reihe h), weil hier die Brandlasten bis zum Faktor 5 größer waren als bei den anderen Versuchen.

3.4 Meßergebnisse

Die Meßergebnisse zeigen deutliche Abhängigkeiten von den gewählten Randbedingungen. Besonders der Verlauf des zeitlichen Gewichtsverlustes des Brandgutes hängt ab von der Art der Anordnung des Brandgutes im Raum, der Größe der Ventilationsöffnungen. Dies wiederum beeinflusst die Höhe der Temperaturen in der Heißgasschicht, den Wärmestrom in die Wand, die Massen- und Energieverluste durch die Dachöffnungen und dadurch die Höhe der Rauchgasschicht. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche.

Die ersten beiden Spalten dienen der Kennzeichnung in Versuchsreihen (siehe Kap. 3.3) und der Unterscheidung der Einzelversuche untereinander. Die folgenden Spalten erfassen die Versuchsparameter wie Menge und Art der Brandlast sowie deren Fläche im Brandraum und machen Angaben über die Anzahl und Größe der Dachentlüftungsöffnungen.

Im anschließenden Teil von Tabelle 1 sind einige Meßergebnisse angegeben worden, wie die maximale Abbrandrate und deren Zeit während des Versuchs sowie die Rauchgasschichthöhe, die Gastemperatur und die Geschwindigkeiten der einfließenden Luft und der ausströmenden Heißgase. Diese Meßwerte stellen eine grobe Übersicht dar. Der genauere Versuchsablauf über die Zeit wird in späteren Kapiteln beim Vergleich von Rechnung und Messung behandelt. In der letzten Spalte sind Angaben über die während des Versuchs herrschenden Windgeschwindigkeiten gemacht worden.

| Versuchsreihe | Versuchsbezeichnung/Datum | Versuchssparameter | | | | Meßergebnisse | | | | | | |
|---------------|---------------------------|--------------------|----------|-------------------------|--------------------|--------------------------|------------|---------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| | | Brandmenge [kg] | Mat. Art | Fläche der Brandl. [m²] | Fläche d. RWA [m²] | max Abbrandrate [kg/min] | Zeit [min] | Rauchgas-schicht-höhe [m] | Gas-temp. [°C] | Dach, Gas-geschwin-digkeit aus [m/s] | Geschwin-digkeit Luft, ein [m/s] | Bemerkung |
| a | 28.07. | 20 | Holz(H) | 0,1 | 0,2 | 1,9 | 11 | 0,9 - 1,1 | 195 | - | - | Tür 0,5 x 2 m |
| | 29.07. | 40 | H | 0,2 | 0,2 | 1,7 | 19 | 0,3 - 2,5 | 210 | 2 | 1,5 - 1,8 | Tür 0,5 x 2 m |
| b | 08.03. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 1,58 | 30 | 1,8 | 170 | 5 | 2 | Wind = 3,5 m/s |
| | 10.03. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 1,58 | 22 | 1,5 - 2,4 | 175 | 5 | 1,5 - 2,0 | " = 2,5 " |
| | 14.03. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 1,63 | 24 | 2 | 185 | 5 | 1 - 3,5 | Wetter: böig |
| | 15.03. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 1,5 | 26 | 1,5 - 2,4 | 195 | 5 | 1,5 - 2,5 | windstill |
| | 22.03. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 1,75 | 30 | 1,5 - 2,1 | 180 | 5 | böig | Wetter: böig |
| | 28.03. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 1,78 | 24 | 1,5 - 2,0 | 195 | 4 - 5,5 | 1,5 - 2,5 | Wind = 2,5 m/s |
| c | 06.05. | 40 | H | 1 | 0,8 | 3,1 | 12 | 1 - 1,4 | 197 | 3 | 3 - 4 | Wind = 2,8 m/s |
| | 09.05. A | 40 | H | 1 | 0,8 | 2,9 | 16 | 0,8 - 1 | 162 | 2 - 3 | 2,5 - 3,5 | " = 2 " |
| | 09.05. B | 40 | H | 1 | 1,2 | 2,9 | 16 | 1 - 1,2 | 149 | 2,5 - 3 | 3 - 3,5 | " = 6 " |
| | 10.05. | 40 | H | 1 | 1,2 | 2,4 | 18 | -1,5 Wirbel | 176 | 2 - 3 | 2,5 - 4,4 | " = 4 " |
| | 16.06. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 2,4 | 20 | 1 - 1,5 | 300 | 3,5 - 5,5 | 2 - 2,8 | " = 2 " |
| | 20.06. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 2,8 | 18 | 1,5 - 2,0 | 320 | 4 - 6 | 3 - 4 | " = 3 " |
| d | 11.05. A | 40 | H | 0,25 | 4 x 0,1 | 2,8 | 16 | -1,5 Wirbel | 177 | 4 - 6 | 2 - 3,6 | Wind = 3,5 m/s |
| | 11.05. B | 40 | H | 0,25 | 4 x 0,1 | 3,7 | 12 | -1,5 Wirbel | 200 | 4 - 5,5 | 1,5 - 3,5 | " = 4,5 " |
| | 23.06. A | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 2,6 | 20 | 1,2 - 1,5 | 296 | 3,5 - 6 | 2 - 2,5 | " = 1,5 " |
| | 24.06. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 2,6 | 18 | 1,5 - 1,8 Wirbel | 343 | 3,5 - 5,5 | 2 - 3,2 | " = 2 " |
| e | 13.05. A | 20 | H | 1 | 4 x 0,1 | 0,8 | 48 | -0,5 Wirbel | 91 | 1 - 2,4 | -1 - +2 | Wind = 3,5 m/s |
| | 13.05. B | 20 | H | 1 | 4 x 0,1 | 0,97 | 38 | Wirbel | 120 | 1,5 - 3,5 | 1,5 - 2,5 | " = 3,5 " |
| | 16.05. A | 60 | H | 1 | 4 x 0,1 | 4,4 | 16 | 1,2 | 336 | 3 - 6 | 2,5 - 3 | " = 0,6 " |
| | 16.05. B | 60 | H | 1 | 4 x 0,1 | 4,3 | 14 | 1,2 - 1,5 | 360 | 3 - 6 | 2 - 3 | " = 0,6 " |
| | 14.06. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 2,5 | 18 | -1,5 Wirbel | 345 | 4 - 6 | 2 | " = 8,0 " |
| | 15.06. | 40 | H | 1 | 4 x 0,1 | 2,7 | 18 | -1,5 Wirbel | 356 | 4 - 6 | 1,5 - 2 | " = 1-6 " |
| f | 21.06. A | 6,02 | Öl | 1 | 4 x 0,1 | 1,05 | 8 | 2,5 | 374 | zu starke Rauchent-wicklung | 2 - 3 | Wind = 3 m/s |
| | 21.06. B | 6,02 | Öl | 1 | 4 x 0,1 | 1,13 | 7 | 2,5 | 337 | | 2 - 3 | " = 4 " |
| | 22.06. A | 5,7 | PP-T | 1 | 4 x 0,1 | 1,03 | 10 | 2,5 | 290 | | 1,5 - 2 | " = 5 " |
| | 22.06. B | 5,7 | PP-T | 1 | 4 x 0,1 | 1,13 | 12 | 2,5 | 260 | | 1 - 2 | " = 1-6 " |
| g | 17.05. | 40 | H | 1 | 2 x 0,2 | 2,86 | 18 | 1,2 - 1,5 | 180 | 3 - 4 | 1,5 - 2,5 | Wind 3-4 m/s |
| | 18.05. A | 40 | H | 1 | 2 x 0,2 | 2,3 | 18 | 1,2 - 1,5 | 185 | 2,5 - 4 | 1,5 - 2,5 | Brandlast in der Ecke |
| | 18.05. B | 40 | H | 1 | 2 x 0,2 | 3,3 | 14 | 1,5 - 1,8 | 308 | 2 - 6 | 1,5 - 3 | Wind 3-6 m/s |
| | 19.05. | 40 | H | 1 | 2 x 0,2 | 2,7 | 14 | 1,2 - 1,5 | 296 | 3 - 5 | 2 - 2,5 | Brandlast in der Mitte |
| | 20.05. A | 40 | H | 1 | 1 x 0,4 | 2,4 | 18 | 1,3 | 187 | 3,5 - 5 | 2 | Wind 2 m/s |
| | 20.05. B | 40 | H | 1 | 1 x 0,4 | 2,3 | 16 | 1,3 | 196 | 3,5 - 6 | 2 - 4,5 | Brandlast in der Ecke |
| h | 27.05. | 317 | H | 18,25 | 4 x 0,1 | 14,4 | 80 | -1,5 Wirbel | 482 | 2 - 6 | 2 - 3 | Zündung in der Mitte |
| | 03.06. | 325 | H | 18,25 | 4 x 0,1 | 16,2 | 66 | -1,5 Wirbel | 554 | 4 - 6 | 2 - 3 | Wind 1-4 m/s |
| | 10.06. | 317 | H | 18,25 | 4 x 0,1 | 3 | 220 | -1,5 Wirbel | 376 | 4 - 6 | 2 - 3 | Zündung in der Ecke |
| | 13.06. | 310 | H | 18,25 | 4 x 0,1 | 3 | 220 | 1,5 | 365 | 4 - 6 | 2 - 3 | Wind 1-4 m/s |

Tabelle 1: Versuchsübersicht, Versuchssparameter und ausgewählte Meßergebnisse

4. Vergleich Rechnung - Messung

4.1 Vorbereitungen zu den Rechnungen

In Abschnitt 2 wurden die theoretischen Grundlagen beschrieben, die den Rechenprogrammen zugrunde liegen. Mit diesen Rechenprogrammen sollen die durchgeführten Versuche nachgerechnet werden. Es wurden die verwendeten Ansätze ausführlich erläutert, die in Übereinstimmung mit Erkenntnissen stehen, die ebenso international Anwendung finden.

Als vorbereitende Arbeiten müssen die in einem Zusatzrechenprogramm ermittelten Absorptionszahlen entsprechend Bild 4 bis 7 als Unterprogramme in das Hauptrechenprogramm eingearbeitet werden. Weitere Eingabewerte im Rechenprogramm sind:

- Raumgeometrie: Länge = 5,00 m
Breite = 4,00 m
Höhe = 2,55 m (die Abbrandwaage ist 0,25 m hoch und ist daher von der Gesamtraumhöhe von 2,80 m abzuziehen)
- Größe der Seiten- und Dachöffnungen:
 - Seite: Türhöhe (m)
Türbreite (m)
 - Dach: RWA - Länge (m)
RWA - Breite (m)
- Stoffwerte der Wandbekleidung (es wird dabei davon ausgegangen, daß überwiegend eine Schamotte-Bekleidung im Brandraum vorherrscht)
 - Dichte: 1800 kg/m³
 - spez. Wärmekapazität: 0,83 kJ/kg·K
 - Wärmeleitfähigkeit: $0,7 \cdot 10^{-3}$ kW/m·K
- Brennstoff: Heizwert (MJ/kg)
- Luftbedarf: r (kgL/kgB)
- Brandlastmenge R (kg)
- Abbrandrate über der Zeit: \dot{R} (kg/min)
- entrainment-Koeffizient: 0,25 (-)

Bei der Abbrandrate muß zweierlei unterschieden werden: In einem der verwendeten Rechenprogramme wird der vollständige Abbrandverlauf über der Zeit, wie er während der Versuche ermittelt wurde, vorgegeben. Dieses Verfahren findet Anwendung, wenn Brände extremes Verhalten erwarten lassen, wie geringe Brandentwicklung und kleine Abbrandrate sowie bei den Versuchen der Versuchsreihe h, bei denen hohe Brandlasten, bezogen zur Bodenfläche, flash-over-Bedingungen hervorrufen.

Mit der zweiten und am häufigsten verwendeten Variante wird die Abbrandrate folgendermaßen in das Rechenprogramm eingebaut: Es wird dazu die maximale Abbrandrate und deren Zeitpunkt aus den Messungen notwendig, so daß unter Verwendung der Gl. (4) bis (6) das Rechenprogramm selbständig den Brandverlauf steuert und somit auf weitere Meßwerte nicht angewiesen ist.

Das zweite hier beschriebene Verfahren zur Vorgabe der Abbrandrate gilt für Brandlasten, wie sie in den vorliegenden Versuchen verwendet wurden, und ebenso für Brandräume ähnlicher Größe, so daß eine Übertragung und Anwendung der Meßmethode auf große Brandräume mit großen Brandlasten im Augenblick nicht möglich ist. Das liegt u. a. daran, daß die Höhe des Raumes und die Höhe der Flamme auf die Masse der Luft Einfluß hat, die in die Heißgasschicht transportiert wird. Diese Effekte werden dadurch hervorgerufen, daß sich der "Entrainment"-Koeffizient mit wachsenden Feuern stark ändert.

Die im folgenden besprochenen Ergebnisse beziehen sich auf Bilder, die im Anhang zu diesem Bericht enthalten sind. Der Anhang ist in die Teile A bis H untergliedert und entspricht der Gliederung der Versuchsreihen entsprechend Tabelle 1.

In Tabelle 2 wird eine Gesamtübersicht der Rechenergebnisse für alle hier diskutierten Versuche gezeigt. Die angegebenen Ergebnisse stellen jeweils die während einer Rechnung auftretenden Maximalwerte dar und können mit den Meßergebnissen (Tabelle 1) verglichen werden. Die in Tabelle 2 angegebenen Größen werden im einzelnen durch graphische Darstellungen im Anhang dieses Berichts wiedergegeben und, sofern direkte Meßwerte dazu vorliegen, verglichen.

| Vers. Bez. | Rauchgas-schicht-höhe [m] | Gas-temp. [°C] | Massenstrom Dach [kg/s] | Wärme-strom Dach [kJ/s] | Geschwin-digkeit Dach [m/s] | Wand-temp. [°C] | Wärmestrom in der Wand [W/cm²] | Geschwin-digkeit Luft (ein) [m/s] | Vers. reihe |
|------------|---------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| 2807 | - | - | - | - | - | - | - | - | a |
| 2907 | 1,2 | 218 | 0,4 | - | 4 | 85 | 0,15/0,23 | 1,5 | |
| 0803 | 1,5 | 180 | 0,75 | 117 | 4 | 75 | 0,14/0,2 | 1,25 | b |
| 1003 | 1,5 | 175 | 0,75 | 114 | 4 | 75 | 0,14/0,21 | 1,3 | |
| 1403 | 1,5 | 180 | 0,75 | 115 | 4 | 80 | 0,15/0,22 | 1,3 | |
| 1503 | 1,5 | 170 | 0,7 | 106 | 3,9 | 75 | 0,13/0,2 | 1,3 | |
| 2203 | 1,5 | 190 | 0,72 | 127 | 4,2 | 80 | 0,16/0,23 | 1,3 | |
| 2803 | 1,5 | 195 | 0,72 | 131 | 4,2 | 87 | 0,17/0,24 | 1,3 | |
| 0605 | 1,15 | 207 | 1,29 | 251 | 3,7 | 90 | 0,25/0,32 | 2,16 | c |
| 0905A | 1,2 | 194 | 1,28 | 231 | 3,58 | 90 | 0,22/0,29 | 2,16 | |
| 0905B | 0,93 | 151 | 1,72 | 231 | 2,91 | 78 | 0,18/0,25 | 2,93 | |
| 1005 | 0,93 | 157 | 1,73 | 243 | 2,97 | 82 | 0,19/0,26 | 2,9 | |
| 1606 | 1,5 | 254 | 0,72 | 175 | 4,5 | 106 | 0,26/0,35 | 1,22 | |
| 2006 | 1,46 | 286 | 0,72 | 204 | 4,81 | 116 | 0,32/0,42 | 1,23 | |
| 1105A | 1,47 | 287 | 0,72 | 205 | 4,82 | 112 | 0,32/0,42 | 1,2 | d |
| 1105B | 1,5 | 358 | 0,73 | 260 | 5,38 | 137 | 0,47/0,6 | 1,16 | |
| 2306A | 1,51 | 270 | 0,72 | 191 | 4,68 | 112 | 0,29/0,38 | 1,19 | |
| 2406 | 1,48 | 267 | 0,72 | 188 | 4,64 | 109 | 0,29/0,38 | 1,19 | |
| 1305A | 1,07 | 96 | 0,52 | 38,6 | 2,3 | 54 | 0,054/0,106 | 0,9 | e |
| 1305B | 1,54 | 127 | 0,64 | 70 | 3,1 | 60 | 0,09/0,15 | 1,11 | |
| 1605A | 1,51 | 413 | 0,72 | 301 | 5,76 | 174 | 0,57/0,76 | 1,17 | |
| 1605B | 1,51 | 400 | 0,73 | 291 | 5,66 | 170 | 0,55/0,71 | 1,15 | |
| 1406 | 1,47 | 261 | 0,72 | 183 | 4,6 | 106 | 0,27/0,36 | 1,2 | |
| 1506 | 1,51 | 281 | 0,72 | 200 | 4,77 | 115 | 0,31/0,41 | 1,19 | |
| 2106A | 1,46 | 270 | 0,71 | 187 | 4,59 | 93 | 0,32/0,4 | 1,26 | f |
| 2106B | 1,43 | 285 | 0,71 | 201 | 4,75 | 92 | 0,36/0,44 | 1,25 | |
| 2206A | 1,49 | 254 | 0,7 | 171 | 4,38 | 90 | 0,31/0,37 | 1,24 | |
| 2206B | 1,47 | 273 | 0,69 | 187 | 4,53 | 95 | 0,34/0,42 | 1,23 | |
| 1705 | 1,53 | 290 | 0,73 | 207 | 4,84 | 122 | 0,34/0,42 | 1,22 | g |
| 1805A | 1,48 | 247 | 0,72 | 172 | 4,46 | 104 | 0,26/0,34 | 1,19 | |
| 1805B | 1,46 | 321 | 0,72 | 232 | 5,09 | 126 | 0,39/0,5 | 1,24 | |
| 1905 | 1,44 | 281 | 0,72 | 200 | 4,76 | 112 | 0,32/0,4 | 1,21 | |
| 2005A | 1,48 | 259 | 0,72 | 181 | 4,56 | 105 | 0,27/0,36 | 1,21 | |
| 2005B | 1,48 | 252 | 0,72 | 176 | 4,51 | 104 | 0,27/0,35 | 1,2 | |
| 2705 | 1,92 | 801 | 0,86 | 767 | 10,9 | 497 | 1,039/3,054 | 1,64 | h |
| 0306 | 1,93 | 797 | 0,86 | 760 | 10,8 | 480 | 1,3/2,9 | 1,9 | |
| 1006 | 1,19 | 349 | 0,73 | 258 | 5,4 | 210 | 0,23/0,53 | 1,18 | |
| 1306 | 1,21 | 357 | 0,73 | 267 | 5,5 | 202 | 0,25/0,55 | 1,18 | |

Tabelle 2: Gesamtübersicht der errechneten Zustände (max.-Werte)
für die durchgeführten Versuche

4.2 Vorversuche (Versuchsreihe a)

Zur ersten Standortbestimmung und zur Überprüfung der Meßeinrichtung wurden zwei Vorversuche durchgeführt.

Als Ventilationsöffnung war ein Abzug von $0,2 \text{ m}^2$ Öffnungsfläche installiert. Als Brandlast wurden Holzkrippen verwendet.

Der erste Versuch wird nicht durch Meßwerte oder graphische Darstellungen wiedergegeben, da er lediglich als Test für die Meßgeräte gedacht war.

Die Ergebnisse des zweiten Versuchs dieser Versuchsreihe (Versuch vom 29.07.1982) sind in den Bildern 1 bis 7 des Anhangs A graphisch wiedergegeben. Aus Bild 1 erkennt man, daß die gemessene Abbrandrate relativ großen Schwankungen unterliegt. Dieser Verlauf ist im Rechenprogramm durch eine Gerade vorgegeben worden.

Die Seitenventilationsöffnung stellte während des Versuchs eine Tür mit den Abmessungen $0,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ dar. Während des Versuchs strömte sowohl kalte Luft über die Öffnung in den Brandraum ein und ebenso heiße Rauchgase im oberen Teil der Türöffnung aus. Diesen Zustand zeigt Bild 4, wobei der Kurvenzug 1 den Massenstrom der einfließenden Kaltluft darstellt und die Kurvenzüge 2 und 3 die Summe der ausfließenden Rauchgasmassenströme. Der Vergleich von Rechnung und Messung für die Höhe der Rauchgasschicht zeigt entsprechend Bild 2 gute Übereinstimmung. Ebenso gute Übereinstimmung konnte für die Temperaturen in der Gasschicht erzielt werden (Bild 3). Die durch das Rechenprogramm ermittelten Temperaturen stellen einen Mittelwert für die gesamte Heißgasschicht dar. Die gemessenen Werte der Temperaturen in der Gasschicht werden durch die Meßstellen M 45 und M 95 wiedergegeben.

Das Thermoelement M 45 ist $0,6 \text{ m}$ in Raummitte unter der Decke angebracht und simuliert den gemessenen Mittelwert der Heißgasschicht. M 95 ist vor der RWA-Öffnung installiert und unterliegt dadurch stärker den strömungsmechanischen Vorgängen im Brandraum. Wenn sich während der Versuche Luftstrahlen von Lufteintritt zur Dachöffnung im Brandraum ausbilden, kann die Temperaturverteilung von M 95 deutlich von M 45 abweichen, da M 95 gekühlt wird. Dieser Einfluß wird später durch böige Windverhältnisse während der Versuche deutlich sichtbar.

Bild 5 zeigt, daß bei der Bestimmung der Lufteintrittsgeschwindigkeit durch Messung lediglich zwei Meßwerte vorlagen, die aber deutlich über den gerechneten liegen. Bild 6 zeigte erste Rechenergebnisse für den Wärmestrom in die Decke, wobei die Decke hier die gesamte Fläche der Seitenwände und der Decke hinter der Heißgasschicht darstellt.

Bild 7 zeigt den Vergleich von Rechnung und Messung für das Vergleichselement "Stein" hinter der Heißgasschicht. Diese Temperaturverteilung gilt für einen Zustand nach 30 min Branddauer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die ersten Rechnungen und Messungen zum Teil gute Übereinstimmung zeigen. Für die weiteren Versuchsreihen wurden einige Veränderungen eingeführt, die den Versuchsaufbau betreffen. So werden anstatt einer Türöffnung zwei sich gegenüberliegende Zuluftkanäle verwendet, damit die Rauchgas nur durch die Dachöffnungen abziehen können.

4.3 Reproduzierbarkeit und Wettereinflüsse (Versuchsreihe b)

Diese und alle folgenden Versuche haben als seitliche Ventilation zwei Zuluftöffnungen von je $0,4 \text{ m}^2$. Weiterhin sind bei allen Versuchen - bis auf Versuchsreihe g - je vier Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen symmetrisch auf dem Dach verteilt.

Mit den sechs Versuchen der Versuchsreihe b sollte sowohl die Frage der Reproduzierbarkeit als auch der Wettereinfluß auf das Versuchsergebnis untersucht werden. Die graphischen Darstellungen sind im Anhang Teil B enthalten.

Bei allen sechs Versuchen war der Versuchsaufbau der gleiche. Es wurden 40 kg Holz als Krippe auf 1 m^2 in der Brandraummitte angeordnet. Lediglich die Windverhältnisse schwankten von Windstille bis zu böigem Wind von ca. 7 m/s . Diese Witterungseinflüsse machen sich bei den Messungen bemerkbar, die durch das Rechenprogramm nicht nachvollzogen werden können. Es sind hier die Druckschwankungen gegenüber der Umgebung von ausschlaggebender Bedeutung. Ergänzend zu diesen Witterungseinflüssen kommt ein Kamineffekt durch die Rauch- und Wärmeabzüge hinzu, die sich auf die Druckverteilung im Brand-

raum auswirken, da die Dachöffnungen durch Vierkantrohre bis zu 1,4 m Länge über die Brandraumdecke hinausragten. Durch diese Voraussetzungen war es nicht möglich, eine neutrale Zone im Brandraum als Übergang zwischen Heißgas- und Kaltgasschicht zu ermitteln. Deshalb war man auf Beobachtungen über die Rauchgasschichthöhe angewiesen, die teilweise stark verwirbelt wurde und durch Witterungseinflüsse schwankte.

In den Bildern 1 bis 48 sind durch Vergleich von Rechnung und Messung die Zustände für die sechs Versuche dargestellt. Die Rechenergebnisse zeigen, daß die physikalischen Vorgänge im Brandraum mit ausreichender Genauigkeit simuliert werden können. Die zum Teil auftretenden größeren Unterschiede von Rechnung und Messung lassen sich durch die Versuchsrandbedingungen erklären.

Die in Bild 6 dargestellten Schwankungen für den Lufteintritt sind durch das Wetter bedingt. Das teilweise Ausströmen auf der Ostseite wird durch die zur Versuchszeit herrschenden Westwinde von ca. 3,5 m/s erklärlich. Der Rechenwert kann als repräsentativ angesehen werden, wobei gesagt werden muß, daß die errechneten Werte für die Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten immer unter den gemessenen Werten lagen.

In Bild 10 tritt z. B. bei der Gasschichthöhe eine Spitze nach 24 min Versuchsdauer auf. Hier ist praktisch der gesamte Brandraum voll Rauch, obwohl kontinuierlich Luft ein- und Gas ausströmt. Dies kann nur durch Druckschwankungen und lokale Verwirbelungen hervorgerufen werden. Die errechnete Verteilung für die Gasschichthöhe zeigt für die übrige Versuchszeit mit hinreichender Genauigkeit eine gute Übereinstimmung mit der Messung.

Die Temperaturverteilung nach Bild 19 zeigt gute Übereinstimmung zwischen dem Rechenwert und der Meßstelle M 45 in der Raummitte. Der Meßwert der Gastemperatur im Rauchabzug dagegen liegt deutlich tiefer als der Heißgasmittelwert. Hier ist ein Einfluß des Windes (Bild 22) über die Lufteintrittsgeschwindigkeit zu erkennen, der durch sich ausbildende Kaltluftströme auf die Temperaturmessung im RWA auswirkt und rechnerisch nicht erfaßt wird.

Extreme Witterungsverhältnisse herrschten beim Versuch RWA 220 383 (Bilder 33 bis 40). Bild 38 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung über der Zeit in den Zuluftöffnungen. Diese Verhältnisse haben ebenso Einfluß auf den gemessenen Wärmestrom in die Wand (Bild 39). Die gerechneten Werte können diese Situationen nicht miterfassen, da das Rechenprogramm lediglich über die Abbrandrate gesteuert wird. Die Abbrandrate (Bild 33) wird nicht erkennbar durch pulsierende Windeinflüsse verändert, so daß der Einfluß des Windes auf das Gesamtverhalten des Brandraums gering bleibt. Daher kann gesagt werden: Die Versuche zeigten, daß unter den vorhandenen Randbedingungen die Versuchsergebnisse reproduzierbar waren und lediglich in einer Breite von 10 bis 20 % schwankten.

Die Verteilung der Abbrandrate (Bild 1, 9, 17, 25, 33, 41) zeigt jeweils einen Haltepunkt in ihrem Maximum. Hier steuert das Rechenprogramm die Abbrandrate selbst, bis 80 % der Gesamtbrandlast verbraucht sind. Lediglich die max. Abbrandrate und deren Zeitpunkt müssen den Rechenprogrammen vorgegeben werden. Die Rechenergebnisse zeigen, daß für eine Brandraumgröße der vorliegenden Art relativ gute Übereinstimmung zu Meßwerten erzielt wird.

In den Bildern 8, 16, 24, 32, 40 und 48 werden die berechneten und gemessenen Wandtemperaturen verglichen. Im Rechenprogramm wurden stets $300\text{ K} \approx 27\text{ °C}$ als Umgebungstemperatur vorgegeben, die beim Versuch nicht vorlagen. Durch Parallelverschiebung der Kurven zeigt sich, daß die Verteilungen gut übereinstimmen.

Zu jedem Versuch wurde die Wärmestromdichte in die Wand durch ein wassergekühltes Wärmestromdichtemeßgerät ermittelt. Diese Werte liegen um den Faktor 3 deutlich höher als die errechneten Werte. Es ist allerdings bekannt, daß wassergekühlte Geräte dieser Art zu große Werte anzeigen, da der Wärmestrom durch eine größere, treibende Temperaturdifferenz (Gas-temperatur - Wassertemperatur) errechnet wird. Auf der anderen Seite zeigen die Rechnungen über die Temperaturverteilung in der Wand gute Übereinstimmung mit den Messungen, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die rechnerisch ermittelten Wärmeströme in die Decke (Gl. 21 und 22) hinreichend genau sind.

Tabelle 2 enthält in der Spalte für den Wärmestrom in die Wand zwei Werte. Der erste und niedrige Wert repräsentiert den resultierenden Wärmestrom in die Wand (Gl. 21 und 22), der die Umfassungsbauteile erwärmt. Der zweite Wert stellt die Gesamtenergie dar, die ein Flächenelement an der Oberfläche belastet, wobei nicht die gesamte Energie in die Wand eindringt, da konvektiv und durch Reflexion Energie in den Brandraum zurückgelangt.

4.4 Variation der Dachentlüftungsfläche (Versuchsreihe c)

In der Versuchsreihe C wurde die Öffnung der Rauch- und Wärmeabzüge in der Decke verändert, wobei der Einfluß auf die Rauchgasschichthöhe, die Gastemperaturen, die Energie- und Massenströme untersucht werden sollen. Die graphische Darstellung der Ergebnisse liegt im Anhang Teil C vor.

Die Brandlastanordnung und -mengen entsprachen denen der Versuchsreihe b). Unter Berücksichtigung der Theorie, die auch der Norm DIN 18 232 zugrunde liegt, sollte bei größer werdenden RWA-Öffnungen die Rauchgasschicht geringer sein, wenn die gleiche Brandlastmenge zugrunde gelegt wird. Die Rechenergebnisse (Bild 2, 11, 20, 29, 38 und 47) für die Gasschichthöhe im Brandraum zeigen eine deutliche Tendenz in dieser Richtung.

Bild 9 (Abbildung in Kap. 4.4) zeigt den Zusammenhang von Gasschichthöhe und RWA-Öffnung, wie er durch die Nachrechnungen der Versuche gefunden wurde. Die RWA-Öffnungen hatten die Größe von 0,4, 0,8 und 1,2 m² und belegen dadurch 2 - 6 % der Brandraumgrundfläche. Der in Bild 9 dargestellte Zusammenhang gilt lediglich für die angegebene Raumgröße und Brandlast. Weitergehende Zusammenhänge bedürfen einer systematischen rechnerischen Parameterstudie, die aber nicht Gegenstand dieser Untersuchungen sind.

Bezüglich der Rauchgasschichthöhe bei den Versuchen konnte der Zusammenhang von RWA-Größe und Rauchgasschichtdicke nicht deutlich nachgewiesen werden. Das liegt wahrscheinlich an den Wetterbedingungen, die besonders bei den Versuchen mit der größten RWA-Öffnung eine Verwirbelung in der Rauchgasschicht hervorgerufen hatten (Tabelle 1).

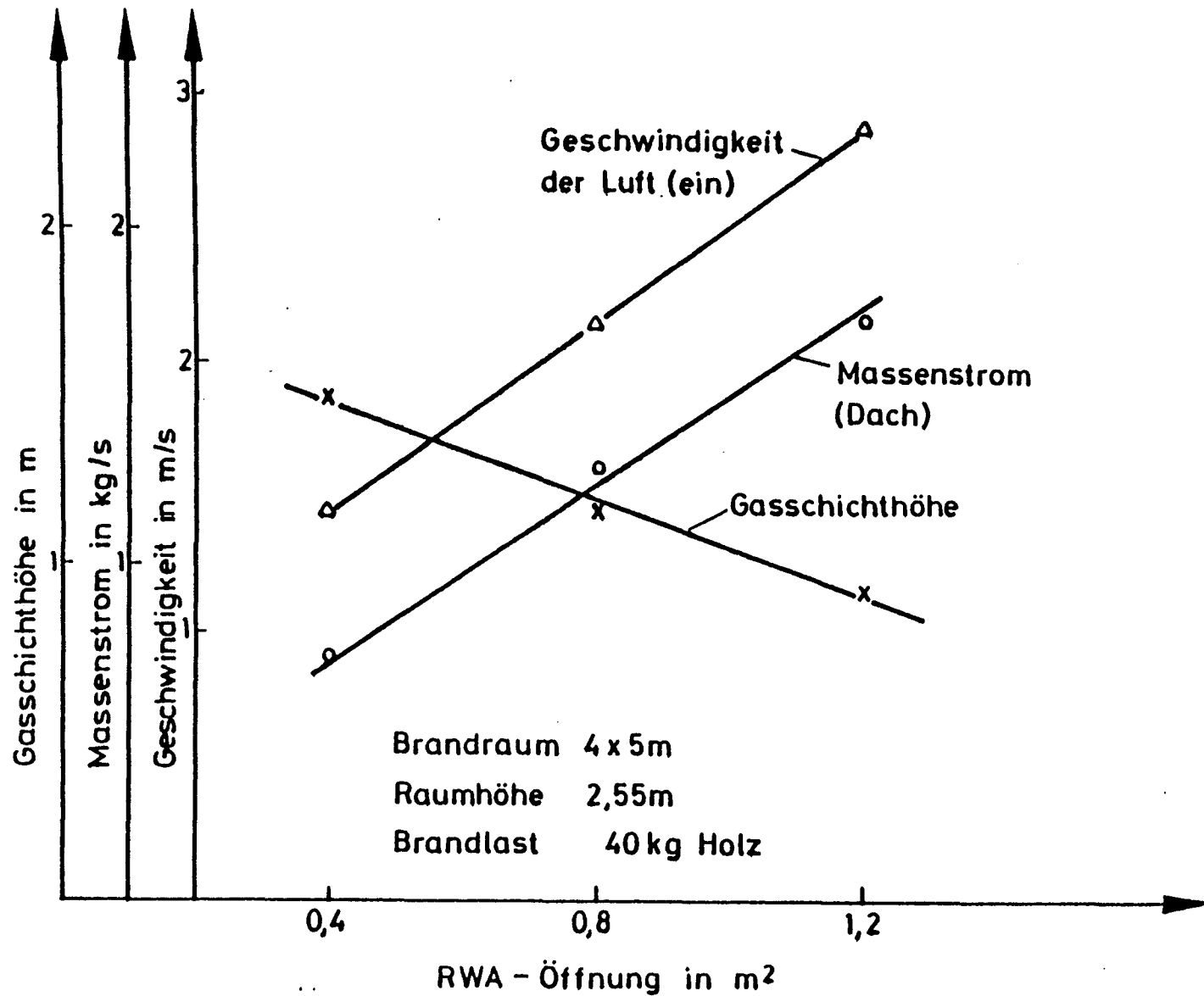


Bild 9: Rechnerische Abhängigkeit der Gasschichthöhe des Heißgasmassenstroms und der Eintrittsluftgeschwindigkeit von der Größe der RWA-Öffnung

Der Vergleich von Messung und Rechnung der Geschwindigkeiten für eintretende Luft und ausfließende Gase zeigen in der Tendenz Übereinstimmung, da mit kleiner werdenden RWA-Öffnungen die Austrittsgeschwindigkeiten steigen, die Massenströme für die Heißgase dagegen fallen und proportional den Geschwindigkeiten der einströmenden Kaltluft sind.

Dieser Zusammenhang ist in Bild 9 dargestellt.

Die Größe der RWA-Öffnung wirkt sich ebenso auf die Gastemperatur aus. Je kleiner die RWA-Öffnung ist, desto größer wird die Heißgasschicht unter der Decke sein, und umso größer ist auch der Wärmespeicher "Gasschicht". Rechnerisch konnten für die Versuche Unterschiede in der Gastemperatur von 151 °C bei 1,2 m² RWA-Öffnung und 280 °C bei 0,4 m² RWA-Öffnung festgestellt werden (Bilder 3, 12, 21, 30, 39, 48). Die Versuchsergebnisse zeigen ein entsprechendes Verhalten.

4.5 Einfluß der Fläche der Brandlast (Versuchsreihe d)

In der Versuchsreihe d wurde untersucht, wie der Brandverlauf beeinflusst wird, wenn einmal die Brandlast von 40 kg Fichtenholz auf einer Grundfläche von 0,25 m² oder auf 1 m² verteilt wird. Dadurch wird eine unterschiedliche Stapelhöhe bei den Brandlasten erreicht, die wiederum Einfluß auf die Abbrandrate und die Temperaturentwicklung im Brandraum hat. Im Anhang Teil D liegt der Vergleich Rechnung-Messung vor (Bilder 1 - 36).

Die Versuche wurden mit einer RWA-Öffnung von 0,4 m² durchgeführt. Rechnerisch konnten bei der Gasschichthöhe keine Unterschiede festgestellt werden. Die Maximalwerte lagen bei 1,5 m für die Gasschichthöhe (Bilder 2, 11, 20 und 29). Die Messungen zeigten ähnliches Verhalten, wobei im letzten Teil der Versuche Verwirbelungen auftraten, so daß keine eindeutige Schichtung im Brandraum zu erkennen war.

Lediglich der Versuch RWA 110 583 B (Bilder 10 - 18) zeigte einen unterschiedlichen Brandverlauf zu den anderen Versuchen der Reihe d. Während des Versuchs herrschten Windgeschwindigkeiten von ca. 4,5 m/s. Durch diesen

Einfluß läßt sich auch die verstärkte Abbrandrate von $\dot{R} = 3,7 \text{ kg/min}$ nach 12 min Versuchsdauer zu einer sonst ermittelten Abbrandrate von $\dot{R} = 2,7 \text{ kg/min}$ nach ca. 18 min Versuchsdauer erklären (Bilder 1, 10, 19 und 28).

Dieser unterschiedliche Verlauf wirkt sich rechnerisch aus, in dem im Gegensatz zu den anderen Versuchen eine höhere Gastemperatur (Bild 12), ein höherer Wärmestrom aus dem Dach (Bild 15), höhere Gasaustrittsgeschwindigkeiten durch die RWA-Öffnungen (Bild 13) sowie höhere thermische Belastungen der Wände (Bild 17) und daraus folgend höhere Wandtemperaturen an der Brandraumoberfläche (Bild 18) ermittelt werden. Ebenso wird durch die verstärkte Abbrandrate die Versuchszeit verkürzt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß im Rahmen der Versuchsreihe d rechnerisch kein eindeutiger Einfluß festgestellt werden konnte, der bei gleicher Brandlast durch eine Brandlastfläche von $0,25 \text{ m}^2$ und $1,0 \text{ m}^2$ hervorgerufen wird. Diese Aussage kann sich lediglich auf den vorliegenden Versuchsaufbau beziehen, denn es ist bekannt, daß in großen Brandräumen (Hallen) die Brandlastfläche Auswirkungen auf den Brandverlauf hat.

4.6 Einfluß der Menge der Brandlast (Versuchsreihe e)

In der Versuchsreihe e wurde die Gesamtbrandlast in Stufen von 20, 40 und 60 kg Fichtenholz variiert, wobei die Brandlast immer auf einer Grundfläche von 1 m^2 angeordnet worden war. Die RWA-Öffnungen waren konstant und hatten eine Fläche von $0,4 \text{ m}^2$. Der Vergleich von Rechnung und Messung ist im Anhang E, Bilder 1 bis 54, graphisch dargestellt.

Bedingt durch die unterschiedlichen Brandlasten ergeben sich unterschiedliche Stapelhöhen, so daß dadurch Auswirkungen auf die Abbrandrate und die Versuchsdauer entstehen und ebenso Auswirkungen auf die Massen- und Energieströme zu erwarten sind.

Es zeigt sich, daß mit steigender Brandlast die maximale Abbrandrate ebenso ansteigt und der Zeitpunkt dieser maximalen Abbrandrate immer früher nach Versuchsbeginn auftritt (Bilder 1, 10, 19, 28, 37 und 46). Die Zuordnung der Randbedingungen zu den Versuchen ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Auffällig ist, daß bei der Brandlast von 20 kg Holz (RWA 130 583 A und 130 583 B) eine Art Schwelbrand auftritt mit langer Versuchsdauer, aber geringer thermischer Belastung der Umgebung. Die Gastemperaturen liegen unter 130 °C. Ebenso sind rechnerisch für die Energie- und Massenströme sowie die Luft- und Gasgeschwindigkeiten geringere Werte ermittelt worden, wenn sie mit den Ergebnissen der Brandentwicklung bei 40 und 60 kg Brandlast verglichen werden.

Die Rauchgasschichthöhen waren bei allen Versuchen ähnlich groß, wobei während der Versuche Verwirbelungen durch Windeinflüsse entstanden. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte zeigen die Rechenergebnisse für die Rauchgasschichthöhe gute Übereinstimmung.

Ein deutlicher Einfluß auf die Gastemperatur, den Wärmestrom durch die RWA-Öffnung, die Brandraumoberflächentemperatur sowie den Wärmestrom in die Wand wurde durch die erhöhte Brandlast von 60 kg deutlich. Dies kann durch Vergleich der Meß- und Rechenwerte den Tabellen 1 und 2 entnommen werden. Ebenso sei auf die entsprechenden Bilder des Anhangs E verwiesen.

Das Rechenprogramm steuert den Brennstoffverbrauch selbständig, wenn die maximale Abbrandrate erreicht ist. Dadurch treten Unterschiede im Brennstoffverbrauch auf, so daß die errechneten Brandzeiten teilweise geringer als die Versuchszeiten sind. Das rechnerische Begrenzungskriterium für die Branddauer ist die noch vorhandene Restbrandlast.

Die Versuche mit 60 kg Holzbrandlast (RWA 160 583 A und 160 583 B) weisen trotz ihrer Heftigkeit noch nicht die Kriterien auf, die in der Literatur als flash-over-Bedingung angegeben wird.

Dies sind eine Brandraumtemperatur von 550 °C oder eine Wärmestrombelastung der Wandoberfläche von 2 W/cm². Die maximalen Werte lagen bei den Rechenergebnissen bei 413 °C und 0,76 W/cm² (Tabelle 2). Die Meßergebnisse für den Wärmestrom in die Wand zeigen dagegen flash-over-Bedingungen.

4.7 Einfluß verschiedener Brandlastarten (Versuchsreihe f)

In der Versuchsreihe f wurden Versuche mit Heizöl EL und PP-Formteilen durchgeführt. Die Brandmaterialien wurden in einer 1 m² großen Wanne gezündet, so daß der Brand an einem festen Ort stattfand und dadurch mit den Holzkrippen vergleichbar wird. Die Brandlasten wurden so gewählt, daß sie den durchgeführten Versuchen mit Holzbrandlasten in ihren Brandauswirkungen etwa entsprachen. Die RWA-Öffnungen hatten eine Größe von 0,4 m². Im Anhang, Teil F, Bilder 1 bis 36, werden die Unterschiede der Rechen- und Meßergebnisse dargestellt.

Der Unterschied der hier verwendeten Brandlasten zu den Holzbrandlasten liegt darin, daß der Heizwert H_u und das Verhältnis des Luftbedarfs bei der Verbrennung eines kg-Brennstoffs (r) deutlich größer sind. So werden für die Berechnungen gewählt:

| | H_u /MJ/kgB | r /kg Luft/kg B |
|--------------|---------------|-------------------|
| Holz | 16,75 | 4 |
| Heizöl EL | 42,7 | 13 |
| PP-Formteile | 39,8 | 15 |

Die Rechenergebnisse zeigen, daß durch die Versuche mit 6 kg Heizöl und 5,7 kg PP-Formteile ähnliche Verhältnisse im Brandraum auftreten, wie bei den Ergebnissen mit 40 kg Holzbrandlast. Das trifft zu auf die im Brandraum erreichten Gastemperaturen, die Wärmeströme aus dem Dach, die Gas- und Luftgeschwindigkeiten und die Wärmeströme in die Wand (Tabelle 2). Lediglich die Temperaturen der Brandraumoberflächen sind geringer. Das rührt daher, daß die rechnerischen Brandzeiten im Vergleich zu den Versuchen mit Holzbrandlasten kürzer waren und dadurch die Wärmeaufnahmezeit verringert war.

Die Messungen zeigten, daß die Gasschichthöhe den gesamten Brandraum ausfüllen. Die Rechnungen ergaben dazu einen deutlichen Widerspruch. Die Gasschichthöhen wurden hier bis zu 1,5 m Höhe berechnet (Bilder 2, 11, 20, 29). Aus Versuchen mit ähnlichen Brandlasten, aber anderen Randbedingungen sind

ebenso wie bei den hier angeführten Meßergebnissen extrem hohe Rauchgasschichten beobachtet worden. Auf der anderen Seite herrschten während der Versuche Winde mit Geschwindigkeiten bis zu 5 m/s, die eine Verwirbelung der Gasschicht mit der Luftschicht hervorrufen können. Das wird durch die kanalartigen Luftzuführungsöffnungen noch verstärkt.

Zusammenfassend muß gesagt werden, daß die Ergebnisse zwischen Rechnung und Messung, bezogen auf die Gasschichthöhe und die ein- und ausströmenden Gase, Diskrepanzen aufweisen, wenn Brandlasten wie Heizöl und PP-Formteile verwendet werden.

4.8 Einfluß des Ortes der Brandlast zur Anordnung der RWA-Öffnungen (Versuchsreihe g)

In der Versuchsreihe g wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Anzahl der RWA-Öffnungen bei konstanter Gesamtöffnungsfläche von 0,4 m² variiert wurden. Zusätzlich wurde der Ort der Brandlast zwischen Brandraummitte und Brandraumecke variiert, um eventuell einen Einfluß der geometrischen Zuordnung zwischen Rauchgasöffnung und Brandlastanordnung zu ermitteln. Die Brandlast war bei allen Versuchen konstant 40 kg Holz. Für diese Versuchsreihe wurden die Zuluftkanäle entfernt, so daß lediglich über die Öffnungen in den Seitenwänden Kaltluft zuströmte und somit keine Luftführung in den Brandraum erfolgte. Der graphische Vergleich von Rechnung und Messung ist im Anhang G, Bilder 1 - 54, dargestellt.

Trotz unterschiedlichen Ortes der Brandlast zur Lufteinströmungsöffnung zeigen sich in den Rechnungen keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen (Tabelle 1 und 2). Die Abbrandraten haben ähnlichen Verlauf (Bild 1, 10, 19, 28, 37, 46). Lediglich die Versuche, bei denen die Brandlast in der Mitte lag (RWA 180 583 B und 190 583), haben nach kürzerer Brandzeit etwas höhere Abbrandraten ($\dot{R} = 2,7$ und $3,3$ kg/min), als sie sonst bei Versuchen mit gleicher Brandlastanordnung erreicht wurden (Mittelwert $\dot{R} = 2,6$ kg/min). Dies kann entweder dem Entfernen der Zuluftkanäle und der Anordnung der RWA-Öffnungen zugeschrieben werden, ebenso ist es möglich, daß die Windgeschwindigkeiten bis zu 6 m/s beim Versuch RWA 180 583 B der Grund für die erhöhte Abbrandrate ist.

Die Ergebnisse aus den Rechnungen zeigen gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Lediglich die Meßergebnisse für die Lufteintrittsgeschwindigkeiten zeigen pulsierendes Verhalten und liegen stets höher als die zugehörigen Rechenwerte (Bilder 7, 16, 25, 34, 43, 52).

Im Rahmen dieser Versuchsreihe konnte weder rechnerisch noch durch die vorliegenden Versuchsergebnisse ein eindeutiger Einfluß festgestellt werden, der durch die Wahl des Ortes des Brandgutes zu den Lüftungsöffnungen im Brandraum hervorgerufen wird. Diese Aussage bezieht sich allerdings nur auf diese Brandraumgröße und die verwendeten Brandlasten. Aus Untersuchungen in größeren Brandräumen weiß man sehr wohl, daß die oben genannten Parametervariationen Einfluß auf die Brandentwicklung haben kann.

4.9 Flächenhaft angeordnete Brandgüter und der Einfluß des Zündortes auf das Brandgeschehen (Versuchsreihe h)

Die in der Versuchsreihe h durchgeführten Versuche unterscheiden sich grundsätzlich von den bisher beschriebenen Versuchen. Der ganze Brandraum wurde flächenmäßig mit Holzbrandlasten belegt, so daß zwischen 310 bis 325 kg Holz im Brandraum vorhanden waren. Die RWA-Öffnungen waren jeweils $0,4 \text{ m}^2$. Es wurde lediglich der Ort der Zündung bei den Versuchen variiert. Es wurde in Raummitte und in der Brandraumecke unter einer RWA-Öffnung gezündet. Sowohl der Tabelle 1 und 2 als auch den Bildern 1 bis 36 des Anhangs H können die Ergebnisse von Messung und Rechnung entnommen werden.

Aufgrund der vorhandenen Brandlast sind die unterschiedlichsten Brandverläufe möglich. Es sind sowohl flash-over-Bedingungen als auch Schmelbrandbedingungen während der Versuche denkbar. Deshalb wurden für diese Versuche die gemessenen Abbrandraten durch mehrteilige Funktionen vorgegeben, zumal sehr große Branddauern zu erwarten waren.

Die Versuche (RWA 270 583 und O30 683), bei denen in der Mitte des Brandraums gezündet wurde, zeigen in ihrem Brandverlauf typische flash-over-Bedingungen. Dies wird sowohl bei den Messungen wie bei den Rechnungen deutlich. Ab ca. 60 min Branddauer steigt die Abbrandrate stark an. Dies wirkt sich auf die Gastemperatur (max $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (Bilder 3, 12), die Massen- und

Energieströme deutlich aus. Ebenso erreicht der Gesamtwärmestrom auf der Wandoberfläche Werte von ca. 3 W/cm^2 (Bild 8, 17). Sowohl die Gastemperatur als auch der Gesamtwärmestrom liegen deutlich höher als die Werte, die für flash-over-Bedingungen angenommen werden ($T = 550 \text{ °C}$, $\dot{Q} = 2 \text{ W/cm}^2$).

Für die Hauptbrandphase wurden Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s in der Dachöffnung berechnet (Bilder 4, 13), aber für die einströmende Luft wurden keine starken Geschwindigkeitsänderungen ermittelt (Bilder 7, 16). Dieser Unterschied wird durch die verstärkte Abbrandrate in der Phase des vollentwickelten Brandes hervorgerufen (Bilder 1, 10). Durch die starke Brandentwicklung sind die Oberflächentemperaturen der Brandrauminnenwände größer ($T = 490 \text{ °C}$). Ebenso wird rechnerisch eine tiefere Erwärmungszone in der Wand aufgrund der längeren Branddauer ermittelt (Bild 9, 18).

Die Versuche, bei denen in einer Brandraumecke gezündet wurde, zeigen einen völlig anderen Brandverlauf (RWA 100 683 und 130 683). Dies zeigt sich schon in der Branddauer von ca. 225 min. Aufgrund der ungünstigen Luftzufuhr zum Brandherd stellt sich eine sehr geringe Brandausbreitung ein, so daß trotz der großen Brandlast geringere thermische Auswirkungen auftreten als bei dem Versuch, bei dem 60 kg Holz zentrisch im Brandraum angeordnet waren (RWA 160 583 A, Anhang E).

Die Temperaturen im Brandraum erhöhen sich langsam und erreichen Werte von ca. 350 °C (Bild 21, 30). Durch die lange Branddauer wurden die Brandraumwände deutlich bis zu einer größeren Tiefe durchgewärmt (Bild 27, 36).

Bei den Messungen zur Gasschichthöhe traten zum Teil Verwirbelungen auf. Soweit die Höhe meßbar war, zeigt sie gute Übereinstimmung mit den Rechenergebnissen (Bilder 2, 11, 20, 29).

Durch die vorgegebenen Abbrandraten aus den Versuchen geben die erzielten Rechenergebnisse die beobachteten Meßergebnisse physikalisch sinnvoll wieder. Es ist schwierig, wie bei dieser Versuchsreihe deutlich gezeigt wurde, die Abbrandrate zu bestimmen, da sie sehr unterschiedlich sein kann. Hier haben z. B. Windeinflüsse und Lufteintrittsmöglichkeiten entscheidende Auswirkungen.

5. Zusammenfassung und Aussagen zur DIN 18 232

Im ersten Teil dieser Arbeit wird ausführlich über die theoretischen Grundlagen berichtet. Die Gleichungen, die zur Erarbeitung der Rechenprogramme notwendig sind, wurden angegeben, wobei ihre Anwendbarkeit und die dazu notwendigen Annahmen oder Einschränkungen erwähnt werden. Ebenso werden die Einzelparameter zur Simulation einzelner Brandabläufe besprochen.

Im folgenden Teil werden die Versuche beschrieben, wobei der Versuchsaufbau, die zu erfassenden Meßgrößen und die Versuchssystematik dargestellt werden. Dieser Teil wird ausführlich durch den Abschlußbericht des MPA-Dortmund behandelt, da im Rahmen dieses Gesamtvorhabens die Brandversuche dort durchgeführt wurden.

Der letzte Teil dieses Berichts umfaßt den Vergleich von Rechen- und Meßergebnissen. Hierzu lagen von 38 Versuchen die Meßergebnisse vor (Tabelle 1), wobei folgende Parameter untersucht wurden:

- Meßanordnung und Meßsysteme,
- Reproduzierbarkeit und Windeinfluß,
- Ventilationsfläche im Dach,
- Fläche der Brandlast,
- Brandlastmenge,
- Brandlastart,
- Relation von Brandlastort und Lage der Dachöffnungen sowie
- Flächenbrandlasten mit unterschiedlichem Zündort.

Jeder der 38 Versuche wurde mit dem Rechenprogramm nachvollzogen, wobei - bis auf die Versuchsreihe h (Tabelle 2) - das Rechenprogramm bei Vergabe von maximaler Abbrandrate und deren Zeitpunkt den Abbrand selbständig steuert und errechnet.

In einem ausführlichen Bildanhang wird der Vergleich von gerechneten und gemessenen Ergebnissen über der Versuchsdauer dargestellt. Die Ergebnisse - sowohl gute Übereinstimmung als auch große Abweichungen von Rechnung und Messungen - werden diskutiert.

Zum besseren Vergleich der Ergebnisse aus Rechnung und Messung werden als graphische Darstellungen neben

- der Abbrandrate,
- der Rauchgasschichthöhe und
- der Rauchgastemperatur

ebenso die folgenden gemessenen und gerechneten Größen berücksichtigt:

- Heißgasaustrittsgeschwindigkeit durch die RWA-Öffnung,
- Lufteintrittsgeschwindigkeit,
- Wärmestrom in die Decke und
- Wandtemperaturverteilung

und ebenso die rechnerisch ermittelten Größen wie

- Massenstrom durch die RWA-Öffnung und
- Wärmestrom durch die RWA-Öffnung.

Bei den Versuchen mit Holzbrandlasten stellten sich im Brandraum im Normalfall definierte Rauchgasschichthöhen und Temperaturgasschichtungen ein, so daß bei der Nachrechnung der Versuche gute Übereinstimmung mit dem Experiment erzielt wurden.

Die aufgetretenen Unterschiede lassen sich durch die beim Versuch vorliegenden Randbedingungen erklären. Durch die Ventilationsöffnungen, ausgebildet als Zuluftkanäle, wirken sich Windgeschwindigkeiten als Druckschwankungen im Brandraum aus. Ebenso kann durch die Höhe von 1,4 m der beim Versuch verwendeten Rauchgasabzüge ein Kamineffekt entstehen. Dadurch können Verwirbelungen verstärkt im Brandraum auftreten, wie bei Versuchen u. a. beobachtet wurde, mit großen RWA-Öffnungen von 1,2 m², geringer Brandlast von 20 kg Holz, großer Stapelhöhe bei kleiner Grundfläche der Brandlast und bei Brandlasten, die zu flash-over-Bedingungen im Brandraum führen. Diese Einflüsse sind bei der verwendeten Brandraumgröße von 4,00 m x 5,00 m x 2,55 m aufgetreten. Bei Bränden in großen Brandabschnitten werden sich unter den oben genannten Bedingungen andere Zustände einstellen, so daß Versuche aus kleinen Brandräumen nicht direkt auf große Brandräume entsprechend DIN 18 232 übertragen werden können.

Unter Normalbedingungen zeigen die Versuchsergebnisse und die Rechnungen, daß die physikalischen Annahmen, die der DIN 18 232 zur Erlangung einer rauchfreien Luftschicht im Brandraum zugrunde liegen, das Brandgeschehen entsprechend beeinflussen.

So zeigt die Vergrößerung der RWA-Öffnung zwischen 2 bis 6 % zur Brandraumgrundfläche rechnerisch deutliche Auswirkungen auf die Rauchgasschichthöhe die Rauchgastemperaturen und die ein- und austretenden Luft- bzw. Gasmassenströme. Dies konnte in der gleichen Tendenz bei den Versuchen ebenso festgestellt werden. Lediglich bei der Rauchgasschichthöhe beeinflussten Witterungseinflüsse die Ergebnisse.

Wird die Grundfläche der Brandlast verändert - bei gleicher Brandlastmenge - wirkt sich das in der Stapelhöhe aus. Aus Versuchen zur DIN 18 230 (m-Faktorbestimmung) und Brandausbreitungsversuchen in großen Brandräumen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen" ist bekannt, daß durch unterschiedliche Anordnung der Brandlast das Abbrandverhalten und somit der gesamte Brandverlauf verändert werden kann. In den hier vorliegenden Versuchen konnten keine eindeutigen Abhängigkeiten in dieser Richtung beobachtet werden. Die theoretischen Ansätze zur Erstellung der vorhandenen Brandraum-Rechenprogramme berücksichtigen diesen Einfluß bisher ebenfalls nicht.

Von entscheidender Bedeutung für den Brandverlauf ist die Menge der vorhandenen Brandlast. Dies wirkt sich beim Brand auf die Rauchgastemperatur sowohl bei Rechnung als auch bei Messung aus. Dadurch wird - wie rechnerisch festgestellt wurde - der Wärmestrom durch die RWA-Öffnung stark beeinflusst. Bei einer RWA-Öffnung von 2 % der Grundfläche wurden rechnerisch keine großen Unterschiede in der Gasschichthöhe festgestellt. Ebenso waren die Unterschiede der nach oben abgeführten Rauchgasmassenströme relativ gering. Lediglich die Austrittsgeschwindigkeiten zeigten bei größerer Brandlast höhere Werte. Die Versuchsergebnisse weisen eine ähnliche Tendenz auf, wurden aber zum Teil durch Wind mit Geschwindigkeiten bis zu 8 m/s beeinflusst.

Bei Versuchen mit geringer Brandlast (20 kg Holz) trat ein schwelbrandartiger Verlauf auf, so daß keine definierte Gasschichthöhe ermittelt werden konnte. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß keine deutliche Rauchgaserwärmung entsteht und durch die "kalten Brandraumbooberflächen die

die Rauchgase abgekühlt werden und nach unten sinken. In den verwendeten Rechenprogrammen wird dieser Vorgang nicht berücksichtigt, so daß rechnerisch definierte Rauchgasschichthöhen ermittelt wurden.

Es gibt für jeden Brandraum eine Grenzbrandlast, mit der bei entsprechender Versuchsanordnung eine flash-over-Brandsituation entsteht. Nach internationaler Literatur sind dies eine Brandraumtemperatur von 550 °C oder eine Wärmestromdichte in die Wand von 2 W/cm². Solange dieser Zustand nicht erreicht wird, sollten Rauchgasschichthöhen feststellbar sein. Dieser Grenzfall scheint für den verwendeten Brandraum mit einer Brandlast von 60 kg Holz bei einer RWA-Öffnung von 0,4 m² fast erreicht zu sein.

Bei den Experimenten mit flächenhaft angeordneten Brandlasten mit ca. 300 kg Holz traten flash-over-Bedingungen auf, so daß keine Rauchgasschichthöhe festgestellt werden konnte. Rechnerisch wurden Werte von ca. 2,0 m ermittelt. Treten bei großen Brandabschnitten (Industriehallen) flash-over-Bedingungen auf, ist der Anwendungsbereich für RWA-Abzugsanlagen nicht mehr gegeben (DIN 18 232).

Bei der Verwendung von Brandlasten wie Heizöl oder PP-T-Formteilen zeigen sich bezüglich der Gasschichthöhe beim Vergleich von Messung und Rechnung die größten Unterschiede. Bei den Versuchen füllte sich der Brandraum ganz mit stark rußenden Rauchgasen. Der Grund liegt wahrscheinlich darin, daß für die Verbrennung dieser Materialien ein bis zu 4-fach größerer Luftbedarf als bei Holzbränden entsteht, und durch die nicht gesteuerte Luftzufuhr an den Brandherd treten - im Gegensatz zur Zerstäubung unter Druck in Ölbrennern - dadurch rußende Verbrennungsvorgänge auf. Wegen des Gewichts der Rußpartikel und der zu Beginn kalten Wandoberflächen des Brandraums verteilen sich die Rauchgasbestandteile im gesamten Brandraum. Eine sichtbare Rauchgasschichthöhe wird sich erst bei mittleren Brandraumtemperaturen > 600 °C einstellen.

Bei ^{kleinen} Brandlasten dieser Art in Industriehallen muß ebenfalls davon ausgegangen werden, daß sich trotz ausreichender RWA-Öffnungen keine eindeutige rauchgasfreie Schicht über dem Boden ausbildet, weil die mittleren Gastemperaturen niedrig bleiben werden. Abhilfe könnte hier durch eine lokale Überdruckhaltung für entsprechende Gebäudebereiche geschaffen werden.

Bei Variation des Ortes der Brandlast zur Lage der RWA-Öffnung konnte weder durch Versuche noch durch Rechnung bei der vorliegenden Brandraumgröße ein Einfluß auf das Brandgeschehen festgestellt werden. Diese Ergebnisse lassen sich aber nicht auf große Brandabschnitte übertragen, weil die Ventilations-einflüsse von Bedeutung sind. Bei den vorliegenden Versuchen war von Einfluß, wo die Brandlast im Brandraum angeordnet war (Raummitte - Raumecke), so daß zu unterschiedlichen Zeiten die max. Abbrandrate auftrat. Dieser Einfluß konnte deutlich durch die Versuche mit flächenhaft angeordneter Brandlast nachgewiesen werden. Bei gleicher Brandlastverteilung und gleicher Ventilation bewirkte ein Zündort in der Brandraumecke ein langsames Abbrennen der Brandlast, bei Zündung in der Brandraummitte dagegen traten in vergleichsweise kurzer Zeit flash-over-Bedingungen auf.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das verwendete theoretische Modell die physikalischen Vorgänge bei Holzkrippenbränden für die vorliegende Brandraumgröße beim Vergleich mit den Versuchsergebnissen mit guter Näherung erfaßt. Bei Brandlasten wie Heizöl oder Kunststoffen entsprach die rechnerische Bewertung der Rauchgasschichthöhe nicht den beim Versuch ermittelten Werten, obwohl die zusätzlich ermittelten Parameter wie Rauchgastemperaturen, Luft- und Gasmassenströme und Geschwindigkeiten sowie Energieströme vergleichbare Werte zeigten. Weiterhin muß erwähnt werden, daß nicht alle erzielten Ergebnisse auf Brandraumgrößen und Brandabschnitte, wie sie in Industriehallen vorliegen, übertragen werden können. Dies bedarf nach den vorliegenden Ergebnissen weiterführender Untersuchungen, die den Brandraumgrößen angepaßt sind.

Dem Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen danken wir für die finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Quintiere, J.: The growth of fire in building compartments. Nat. Bureau of Standards, Preprint No. 7, Gaithersburg, 1976.
- [2] Pape, R., et al.: Semistochastic approach to predicting the development of a fire in a room from ignition to flash-over, RFIRES. Nat. Bureau of Standards, IITRI Project J 6367, 1976.
- [3] Tanaka, T.: A Model for fire spread in small scale buildings. Building Research Institute, CIB-Paper W 14/78/39(J), Tokyo, 1978.
- [4] Reeves, J.B., McArthur, C.D.: 3. Volume Report, FAA-RD-120, University of Dayton, Res. Inst., 1976.
- [5] Mitler, H.E.: The Physical Basis for the Harvard Computer Fire Code III. Harvard University Cambridge, Massachusetts, Home Fire Project Technical Report No. 34, 1978.
- [6] Schneider, U., Haksever, A.: Wärmebilanzrechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Randbedingungen (Teil I), Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1980.
- [7] Delichatsios, M. A.: Fire Growth Rates in Wood Cribs, Combustion and Flame 27, 267 - 278, 1976.
- [8] Quintiere, J.G.: An Approach to Modelling Wall Fire Spread in a Room, Fire Safety Journal, 3, 201 - 214, 1981.
- [9] Thomas et al.: Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No. 7, London, 1963.
- [10] Schneider, U.: Rauch- und Wärmeabzug in Gebäuden, Literatursichtung im Hinblick auf DIN 18 230, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1978.
- [11] Cooper, L.Y., Harkleroad, M., Quintiere, J., Rinkinen, W.: The Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multi-room Fire Scenarios, ASME-Paper 81-HT-9, 1981.
- [12] Rockett, J.A.: Fire Induced Gas Flow in an Enclosure, Combustion Science and Technology, Vol. 12, S. 165 - 175, 1976.
- [13] Quintiere, J.G., Rinkinen, W.J., Jones, W.W.: The Effect of Room Openings on Fire Plume Entrainment. Combustion Science and Technology, in Vorbereitung, 1981.
- [14] Prahl, J., Emmons, H.W.: Fire Induced Flow Through an Opening Combustion and Flame, 25, S. 269 - 385, 1975.
- [15] Zukoski, E.E.: Convective Flows associated with room fires, Semiannual Progress Report, Grant No. 31892 XI, California Institute of Technology, USA, 1975.

- [16] Steward, F.R.: Prediction of the Height of Turbulent Diffusion Flames
Combustion Science Technology, Vol. 2, 203 - 212, 1970.
- [17] Schmidt, W.: Z. angew. Math. Mech. 21, S. 265 ff und S. 351 ff, 1941.
- [18] Yik, Chia-Shun: Fire Convection due to a Point Source of Heat, Proc.
1st U.S.Nat. Congr. Appl. Dech., 941 - 947, 1952.
- [19] Yokoi, S.: Study of the Prevention of Fire-Spread caused by Hot Upward
Current, Report No. 34, Building Research Institute, Japanese Govern-
ment, 1960.
- [20] Günther, R.: Verbrennung und Feuerungen, Springer-Verlag Berlin, 1974.
- [21] VDI-Wärmeatlas, 3. Auflage, 1977.
- [22] Schneider, U., Haksever, A.: Bestimmung der äquivalenten Branddauer von
statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonbalken bei natürlichen Bränden.
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Univer-
sität Braunschweig, 1977.
- [23] Arnault, P., et al.: Rapport Experimental Sur les Essais Avec Des Feux
Naturels Executes Dans Les Petite Installation. Maisières-Les-Metz,
1973.
- [24] Babrauskas, V., Williamson, R.B.: Post-flashover Compartment Fires:
Basis of a Theoretical Model, Fire and Materials, Vol. 2, No. 2,
S. 39 - 53, 1978.
- [25] Shang, T.L., A dynamic Model of once-through supercritical pressure
Boiler, Dissertation Zürich, 1971.
- [26] Kasperek, G.: Der Energieaustausch durch Wärmestrahlung zwischen Fest-
stoffoberflächen, BWK, Nr. 24, S. 229 - 233, 1972.
- [27] Ermakow, S.M.: Die Monte-Carlo-Methode und verwandte Fragen, R. Olden-
bourg Verlag, Mnchen, 1975.
- [28] Sachs, L.: Angewandte Statistik, Springer-Verlag, Berlin, 1974.
- [29] Toor, J.S.: Radiant Heat Transfer Analysis among Surfaces Having
Direction Dependent Properties by the Monte-Carlo-Method, Thesis,
Purdue University, Lafayette, 1967.
- [30] Dobbernack, R., Schneider, U.: Wärmebilanzrechnungen in Brandräumen
unter Berücksichtigung der Mehrzonenmodellbildung. Schriftenreihe des
Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen
Universität Braunschweig, Heft 59, 1983.
- [31] Schack, K.: Berechnung und Strahlung von Wasserdampf und Kohlen-
dioxyd, Chemie Ingenieur Technik, Heft 2, 42. jahrg., 53 - 58, 1970.
- [32] Siegel, R., Howell, J.R.: Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw
Hill, New York, 1972.
- [33] Gebhard, B.: Unified Treatment of Thermal Radiation Transfer Processes,
Gray, Diffuse Radiators and Absorbers, ASME-Paper No. 57-A-34, 1957.